



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**IMPAKTOR PRO LABORATORNÍ ZÁCHYT JEMNÝCH  
ČÁSTIC**

IMPACTOR FOR LABORATORY CAPTURE OF FINE PARTICLES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Daniel Kodad

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Daniel Kodad**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Impaktor pro laboratorní záchyt jemných částic

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku záchytu jemných částic rozptýlených ve vzduchu. V rámci řešení budou uvedeny používané způsoby laboratorního záchytu. Bližší pozornost bude věnována záchytu jemných částic změnou směru proudu vzduchu unášejícího částice (impakce). Uveden bude výpočet základních rozměrů jednoduchého impaktoru na základě veřejně dostupné výpočtové metodiky. Vypočtené hodnoty budou porovnány s rozměry dostupného impaktoru, na kterém dojde k seznámení s jeho použitím. Pro konkrétní zadání bude navržen vlastní impaktor a zpracována potřebná technická dokumentace.

### Cíle diplomové práce:

1. Uveďte problematiku jemných částic v ovzduší, popište princip a související teorii záchytu jemných částic změnou směru proudu vzduchu.
2. Zpracujte výpočtový postup pro návrh hlavních rozměrů kaskádového impaktoru.
3. Na dostupném profesionálním impaktoru ověřte platnost zpracovaného výpočtového postupu.
4. Pro konkrétní zadání zpracujte výpočtovou a výkresovou dokumentaci impaktoru.

### Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANTOR, R., Částice v ovzduší a možnosti jejich měření, 2017. Bakalářská práce VUT FSI.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou jemných částic v ovzduší a teorií jejich zachytu. V úvodní části jsou popsány základní charakteristiky jemných částic a mechanismy, podle kterých se částice chovají. Popsán je vliv na lidské zdraví a rizika, které vdechované částice pro lidské tělo představují. Další kapitola vysvětluje vliv částic v ovzduší na životní prostředí, historický vývoj stavu ovzduší v ČR a popsány jsou nejvýznamnější znečišťující látky. Dále pak základní právní předpisy, které regulují limity stanovené pro tyto látky. V praktické části je vysvětlen výpočetní postup kaskádového impaktoru, dále samotný návrh třístupňového impaktoru a jeho srovnání s profesionálním impaktorem. Navrhnutý impaktor byl dále sestaven a otestován na měřicí trati se zdrojem částic z krbových kamen.

# Abstract

The focus of this master's thesis is the issue of fine dust particles suspended in the air and their measurement. The thesis explains the basic characteristics of fine particles and the rules, which they follow. The section then examines the health risks of inhaled particles. Next is explained the influence of particles in the air on the environment, the historical development of the air pollution in the Czech Republic and the most important pollutants. After that is described the legislation, which frames the limits for pollutants suspended in the air. In the practical part is described the methods for calculation the geometry of cascade impactor, the design of three-stage impactor and finally the comparison with professional impactor. The designed impactor was then constructed and tested with wood burning stove as a source of particles.

# Klíčová slova

Jemné částice, impaktor, emise, imise, znečištění ovzduší

# Keywords

Fine particles, impactor, emission, immission, air pollution

## **Bibliografická citace**

KODAD, *Daniel*. *Impaktor pro laboratorní zachyt jemných částic* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132266>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne

Podpis:

## **Poděkování**

Děkuji doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za jeho pomoc, rady a čas věnovaný této práci. Děkuji také kolegům Ing. Tomášovi Sitkovi a Ing. Jánů Poláčikovi za výpomoc při sestavení měřicí tratě a cenných rad při laboratorní práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za psychickou a materiální podporu během celého studia.

# Obsah

1. Úvod .....	10
2. Jemné částice v ovzduší .....	11
2.1. Ekvivalentní velikost částice.....	12
2.2. Vliv na lidské zdraví.....	13
2.2.1. Šíření infekce .....	15
3. Znečištění ovzduší .....	16
3.1. Nejvýznamnější znečišťující látky.....	16
3.2. Ovzduší v ČR.....	17
4. Legislativa k ochraně životního prostředí .....	18
4.1. Emisní limity.....	19
4.2. Imisní limity.....	22
4.3. Měření emisí TZL.....	23
4.4. Měření imisí TZL.....	24
5. Metody pro měření TZL.....	26
5.1. Gravimetrická metoda .....	26
5.2. Fotometrická metoda .....	28
5.3. Vzorkování podle elektrické mobility .....	28
5.4. Radiometrická metoda .....	29
5.5. Mikroskopie .....	29
6. Návrh impaktoru .....	30
6.1. Výpočetní postup .....	30
6.2. Vypočtené hodnoty .....	34
6.3. Konstrukce impaktoru .....	36
6.4. Výsledný impaktor .....	38
6.5. Příprava impaktoru pro měření .....	48
6.6. Měřicí trať .....	50
6.7. Srovnání s profesionálním impaktorem .....	52
7. Závěr.....	55
Citovaná literatura.....	56
Seznam použitých symbolů .....	58
Seznam obrázků.....	59



Seznam tabulek .....	60
Seznam příloh .....	61

# 1. Úvod

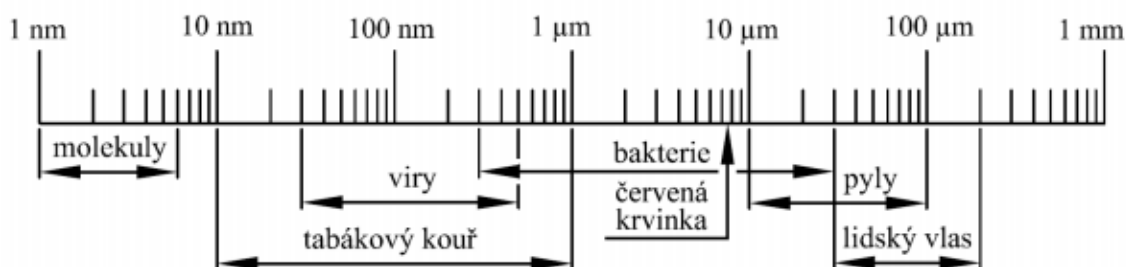
Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku zachytu jemných částic rozptýlených ve vzduchu a způsoby jejich měření. Přestože se ovzduší v České republice od osmdesátých let výrazně zlepšilo, stále dochází k překračování stanovených imisních a emisních limitů. Světová politika směřuje globálně ke snižování emisí a ke zlepšování stavu ovzduší, k tomu je zapotřebí vědět jak se částice v ovzduší chovají a jak takové částice měřit.

Současná legislativa stanovuje emisní limity na celkové množství tuhých znečišťujících látek v plynu, avšak imisní limity jsou stanoveny zvláště pro frakce  $PM_{10}$  ( $PM_x$  – z anglického particulate matter, jedná se o částice menší než  $x \mu m$ ) a  $PM_{2,5}$ . Tyto velikostní třídy jsou tedy nejčastěji měřené frakce při zjišťování stavu ovzduší. Obecně však platí, že čím je částice menší, tím snáze proniká hlouběji do dýchacího ústrojí, proto se často k měřeným třídám přidává i frakce  $PM_1$ . Částice v ovzduší mohou mít antropogenní původ, tedy způsobené lidskou činností, či přírodní, nejčastěji lesní požáry či sopečná činnost. V případě antropogenního původu se jedná primárně o spalovací procesy, průmyslové procesy či vytápění domácností, které je podle dat Českého hydrometeorologického ústavu nejvýraznějším producentem částic  $PM_x$ .

Výstupem této práce je třístupňový kaskádový impaktor, který měří částice  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$ . Impaktor byl vyroben, sestaven a otestován v laboratoři na měřící trati se zdrojem částic z krbových kamen. Pro impaktor byla navržena a vyrobena škrticí clona udávající maximální objemový průtok impaktorem. Tento impaktor byl následně porovnán s dostupným profesionálním impaktorem DEKATI DLPI+.

## 2. Jemné částice v ovzduší

Tuhé znečišťující látky (TZL) se staly v posledních desetiletí závažným globálním problémem a ovlivňují zdraví obyvatelstva mnohem více než jiné škodliviny. V devadesátých letech minulého století bylo dosaženo významného zlepšení kvality ovzduší v ČR, avšak v mnohých oblastech jsou stále překračovány imisní limity pro ochranu zdraví obyvatelstva. Zejména se jedná o oblasti silně zatížených dopravou a průmyslem. Mezi nejvýznamnější zdroje TZL patří spalovací procesy, zejména malá spalovací zařízení. Nízké komíny, způsobující kumulaci jemných částic v dýchací zóně, a absence kontrolních mechanismů, jako u velkých zdrojů znečišťování ovzduší, jsou hlavními důvody proč hrají malé zdroje zásadní roli při překračování imisních limitů. Velikost TZL se pohybuje v širokém intervalu od přibližně 0,1 nm po 1 mm. Obrázek č. 1 znázorňuje velikosti nejčastěji se vyskytujících částic [1].

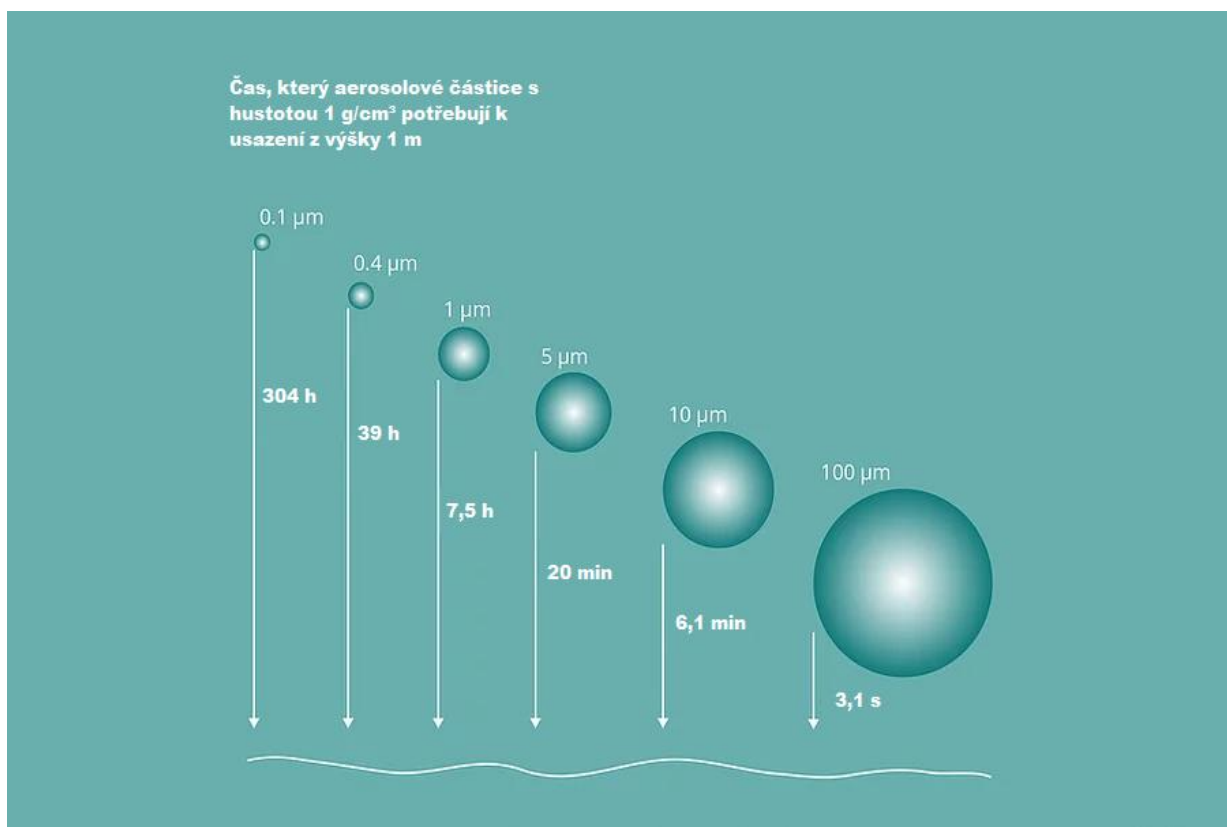


Obrázek 1: Interval velikostí částic [2]

Pevné či kapalné částice v ovzduší tvoří spolu se vzduchem aerosol (ze starořeckého aēr, neboli „vzduch“, a latinského solutio, které znamená „roztok“). Jedná se o heterogenní směs částic a plynu. Částice mohou mít původ přírodní, například sopečný popel, lesní požáry či sůl vypařená z moře. Částice vyprodukované lidskou činností vznikají nejčastěji spalováním fosilních paliv, těžba uhlí či kamene, stavební činnost a zacházení se sypkými materiály či zemědělství. Pokud sledovaný vzorek obsahuje částice v úzkém rozmezí velikostí, hovoříme o monodisperzním vzorku. Běžně se však vyskytují částice velmi odlišných velikostí, takový systém označujeme jako polydisperzní. Pro takové případy rozlišujeme poměrné zastoupení jednotlivých velikostí, které dále popisuje vlastnosti takového vzorku. Kapalné částice zpravidla zaujímají kulovitý tvar, v případě pevných částic je jejich tvar často nepravidelný a tedy složitý pro popisování jeho chování. Pro takové případy zavádíme aerodynamický (ekvivalentní) průměr [3].

Aerosolové částice v ovzduší jsou často unášeny turbulentním prouděním, které se mění v závislosti na okolní teplotě. Vliv na usazování částic na površích má primárně jejich velikost, dále také jejich náboj, okolní teplota a rychlost proudění. Pro částice menší než 0,1  $\mu\text{m}$  je jedním z nejvýznamnějších mechanismů tzv. Brownův molekulární pohyb. Jedná se o náhodné pohyby molekul, při kterých dochází k přenosu energie a hybnosti, tím i k změnám rychlosti a směru pohybu částice. Při usazení částic pomocí tohoto mechanismu mluvíme o difuzi částice. S rostoucí velikostí částice klesá význam

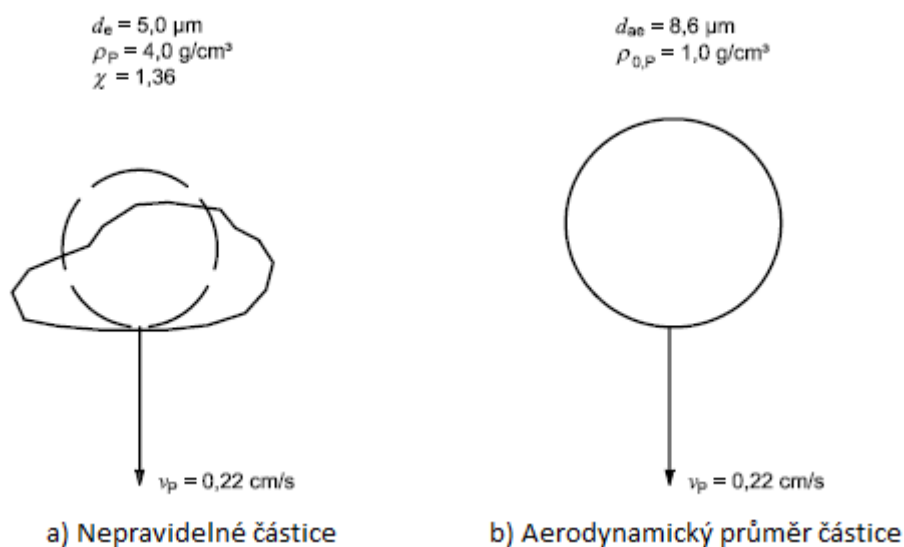
difuze a větší roli hraje gravitace. Při pohybu částice v okolním vzduchu působí proti pohybu třecí síla, která způsobuje aerodynamický odpor. Ten je závislý mimo jiné na hustotě a tvaru částice, obrázek č. 2 znázorňuje rychlosti usazování pro ideální kulové částice v nehybném vzduchu. Roli hraje i relativní vlhkost, při vyšších hodnotách mohou malé částice absorbovat a akumulovat vlhkost, čímž se stanou těžší a větší, gravitace takové částice ovlivňuje opět více. Částice někdy nesou přirozený elektrický náboj a lze je odstranit s vysokou účinností pomocí náboje opačného [4].



Obrázek 2: Gravitační sedimentace kulové částice [4]

## 2.1. Ekvivalentní velikost částice

Jednou z nejdůležitějších vlastností částic při jejich odlučování je tvar částice. Avšak jak bylo již zmíněno, tvar pevných částic je zpravidla nepravidelný a složitý. Spolu s velikostí částice jsou to hlavní faktory definující pohybové vlastnosti částice, které mají přímý vliv na jejich odlučování u mechanických a elektrických odlučovačů. Reálné nepravidelné tvary částice se nahrazují charakteristickými ekvivalentními rozměry pro snadnější popis částice. Existuje velké množství typů ekvivalentních rozměrů, volíme je podle použité měřicí metody. Při setrvačném odlučování se používá ekvivalentní velikost částice se zachováním rychlosti usazování. Typickým příkladem této metody je právě impaktor. Ekvivalentní částice má poté totožnou pádovou rychlost jako reálná částice, ale její nepravidelný tvar je nahrazen idealizovaným kulovým tvarem s jednotnou hustotou částice  $\rho_{\text{č}} = 1000 \text{ kg/m}^3$  [5].



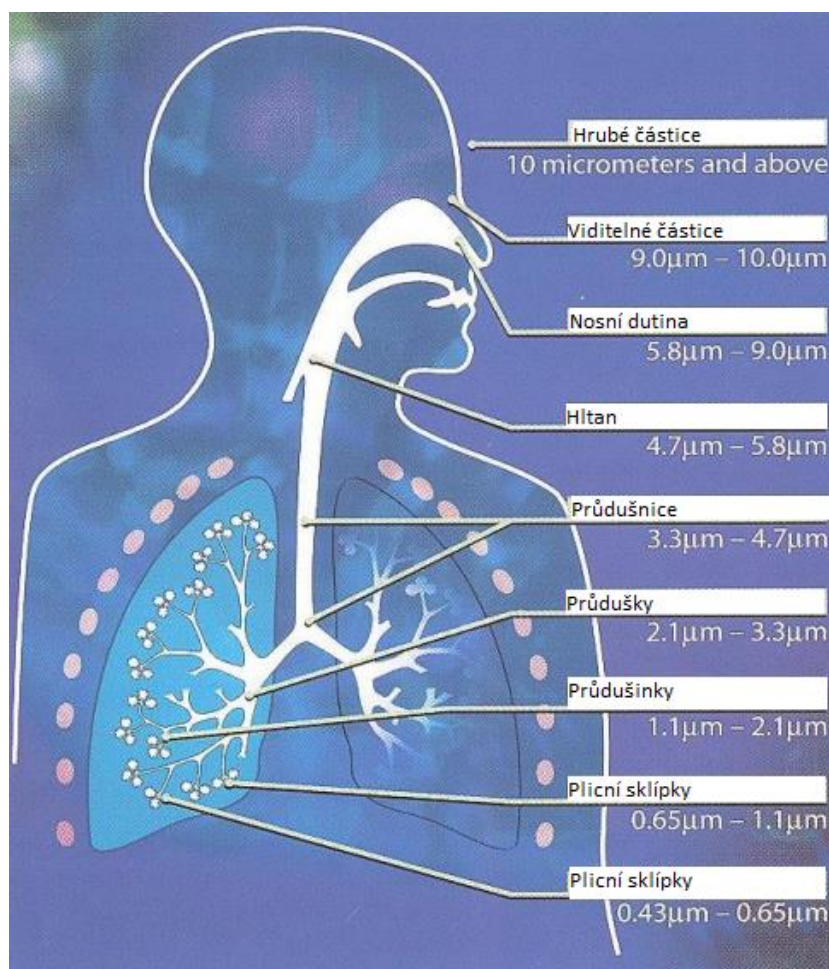
Obrázek 3: Ekvivalentní velikost částice se zachováním rychlosti usazování [5]

## 2.2. Vliv na lidské zdraví

Přibližně 90 % obyvatel evropských měst je vystaveno znečišťujícím látkám v koncentracích vyšších než úroveň kvality ovzduší, které jsou považovány za zdraví škodlivé. [6] Světová zdravotnická organizace (WHO) odhaduje, že za rok 2016 došlo k přibližně 4,2 milionům předčasných úmrtí zapříčiněných znečištěním ovzduší. Až 91 % těchto úmrtí připadají rozvojovým a nově industrializovaným zemím. [7]

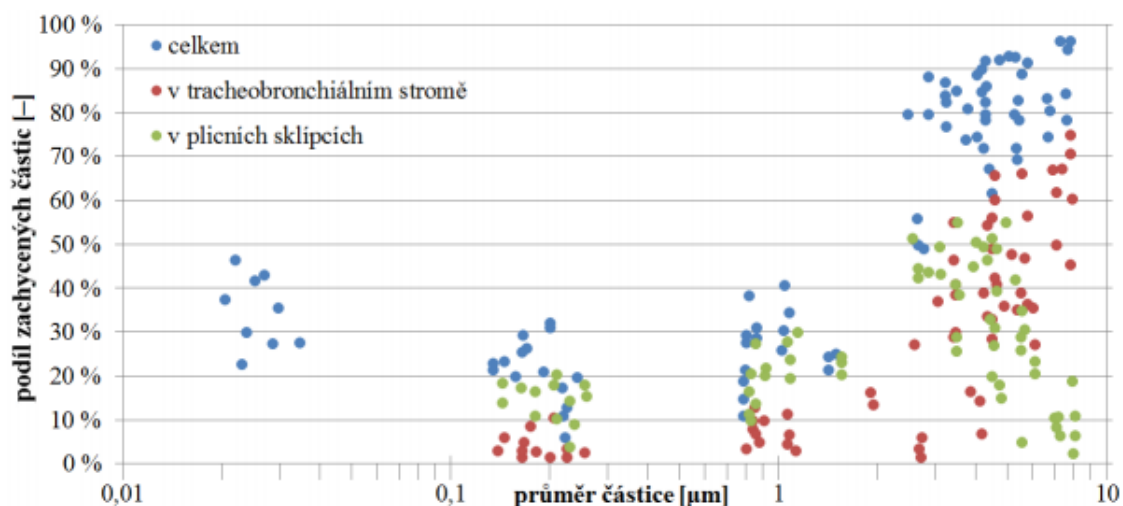
Při posuzování vlivu na lidské zdraví jsou nejvýznamnějšími vlastnostmi chemické složení částic, velikost a tvar. Z měření je vysledováno, že menší částice jsou často nebezpečnější, než částice větší o stejné hmotnosti. Toto riziko je způsobeno vysokým počtem částic a mnohem vyšší aktivní plochou menších částic. Pomocí této aktivní plochy jsou schopny částice snáze zachytávat nebezpečné škodliviny, které mohou být takto nesený do organismu. Polévatý prach má nebezpečnou schopnost adsorbovat polutanty, jako například  $\text{SO}_2$ , benzo[a]pyren nebo těžké kovy, které se tak snadněji dostávají do organismu.

Dále platí, že velikost vdechovaných částic určuje místo v dýchacím traktu, kde se částice usadí. Z tohoto důvodu se rozděluje částice do velikostních frakcí  $\text{PM}_x$  (particulate matter s frakcí menší než  $x \mu\text{m}$ ). Čím je částice menší, tím hlouběji v traktu se usadí. Částice  $\text{PM}_{10}$  se při vdechnutí z velké částice zachytávají již v horních cestách dýchacích na nosní nebo ústní sliznici. Přibližně 90 % celkové hmotnosti TZL se skládá právě z této frakce, proto pouze hmotnostní podíl frakce nestačí pro popis vzorku. Částice  $\text{PM}_{2,5}$  se zachycují v průduškách a částice  $\text{PM}_1$  v plicních sklípcích. Ultrajemné částice, kterými se rozumí částice menší než  $0,1 \mu\text{m}$ , jsou až stotisíckrát menší než buňky lidského těla. Při vdechnutí snadno proniknou nosní membránou a odtud se mohou dostat až do centrálního nervového systému. Pokud se dýcháním dostanou do plic, jsou schopny překonat biologické bariéry dostat do krevního oběhu a dále se ukládat do orgánů.



Obrázek 4: Zachycení částic v těle

Velikost částice není jediným faktorem, který ovlivňuje místo, kde se částice v těle usadí. Tento děj ovlivňuje primárně ojedinělost dýchacího traktu každého člověka, tedy tvar, vlastnosti dýchací soustavy a způsob dýchání. Sledování a generalizace zachycení částic v lidském těle tedy není jednoduché. Existují studie, které nabízejí přibližné modely pro usazování částic v jednotlivých částech dýchací soustavy, přesnější výsledky ale nabízejí experimenty na dobrovolnících. Právě pro jedinečnost dýchacího traktu lze i v těchto výsledcích vidět značný rozptyl, přesto se ale jedná o nejvíce vypovídající údaje. Z grafu na obrázku č. 5 lze vidět již zmíněný důležitý faktor pro hloubku usazování, a to velikost. Větší částice se zachytí spíše v průduškách, ty menší se usazují s vyšším podílem až v plicních sklípcích. Lze si také všimnout, že zdaleka ne všechny vdechnuté částice se v těle usadí, velkou část zpět vydechneme, aniž by se stihly zachytit v dýchacím traktu [8].



Obrázek 5: Podíl zachycených částic z experimentů na dobrovolnících [9]

Protože se v těle neustále usazuje obrovský počet částic, lidské tělo disponuje několika samočišticími a ochrannými schopnostmi. Hned první ochranou v nosních dutinách jsou chloupky, na kterých dochází k zachytu primárně velkých částic. Stěny dýchacích cest jsou pokryty řasinkovým epitelem, přibližně 5  $\mu\text{m}$  dlouhými výrůstky protáhlého tvaru, které mají na svých koncích tenký film hlenu. Řasinky se neustále vlní, až 1000x za minutu, čímž posouvají film hlenu směrem k hltanu, kde je následně vykašlán či spolknut. [2] Pokud se částice nedostane z těla pomocí hlenu, může být pohlcena speciální buňkou, tento proces se nazývá fagocytóza.

Vědomosti o způsobu usazování částic a jejich chování využíváme mimo jiné i ve farmaceutickém průmyslu. Při výrobě léčiv určených k inhalaci, primárně k léčbě dýchací soustavy, je nutné znát tyto vlastosti, aby se při inhalaci lék dopravil a usadil na požadovaném místě. Tyto poznatky jsou také důležité při výrobě mechanických filtrů či v dnešní době důležitých respirátorů.

### 2.2.1. Šíření infekce

Pandemie nemoci COVID-19, způsobené virem SARS-CoV-2, poukázala na význam znalostí šíření aerosolů a jejich depozice. Viry, jakožto organické mikroskopické částice, se řídí stejnými fyzikálními vlastnostmi jako kterékoliv jiné částice. Samotný virus SARS-CoV-2 má velikost od 0,06 od 0,14  $\mu\text{m}$ . Pro viry na povrchu kůže a sliznic je prakticky nemožné, aby se oddělily z těchto povrchů samovolně, přenášejí se tedy vzduchem zpravidla na jiných a větších kapalných či pevných částicích. Důležitým faktorem při posuzování rizika nakažení je koncentrace virových částic v okolí. Existuje tedy velký rozdíl mezi rizikem v uzavřených a venkovních prostorech. Aerosol s částicemi viru se ve venkovním prostředí velmi rychle ředí s čerstvým vzduchem, čímž rychle klesá koncentrace virových částic a tedy i riziko nakažení. Mylnou domněnkou je častý názor, že tkané filtry slouží jako „síta“ a tedy že takové filtry zadrží pouze částice větší, než jsou mezery mezi jednotlivými vlákny. Ve skutečnosti je opak pravdou a primárně díky

Brownovu molekulárnímu pohybu jsou s vysokou účinností filtrovány zejména malé částice [4].

### 3. Znečištění ovzduší

Pro posuzování dopadu TZL na životní prostředí rozlišujeme pojmy „emise“, čímž rozumíme znečišťující látky vypouštěny ze zdrojů, a „imise“, znečišťující látky, které jsou již obsaženy v ovzduší. V České republice se monitorováním kvality ovzduší zabývá Český hydrometeorologický ústav, který provozuje Statní síť imisního monitoringu. Při vyhlášení smogové situace, jsou určeny prahové hodnoty dle doporučení Světové zdravotnické organizace (WHO) s ohledem na dopady mimořádného znečištění ovzduší na lidské zdraví. Prahové hodnoty se dělí na informativní prahové hodnoty a regulační (varovné) hodnoty. Informativní prahová hodnota značí míru znečištění ovzduší, která při krátkodobé expozici může představovat zdravotní rizika pro zvláště citlivou skupinu obyvatelstva. Regulační prahová hodnota představuje úroveň znečištění, která může představovat zdravotní rizika pro celou populaci.

#### 3.1. Nejvýznamnější znečišťující látky

Mezi nejvíce problematické látky pro životní prostředí a lidské tělo patří tuhé částice  $PM_x$ , oxidy dusíku ( $NO_x$ ), oxid siřičitý ( $SO_2$ ), přízemní  $O_3$  a benzo(a)pyren (BaP), jedná se proto o nejčastěji sledované látky při vyhodnocování stavu ovzduší. [10]

**Tuhé částice** dělíme na primární a sekundární. Primární částice jsou emitované ze zdrojů a dělíme je dále na antropogenní, tedy částice tvořeny spalováním fosilních paliv, z dopravy či technologických procesů, a dále částice z přírodních zdrojů. Sekundární tuhé částice vznikají v ovzduší při chemických a fyzikálních procesů nukleací či kondenzací již suspendovaných částic. Malé částice  $PM_{2,5}$ , označovány v anglické literatuře jako fine particles, zvětšují svou velikost právě koagulací a kondenzací, jejich velikost však zpravidla nepřesahuje 2  $\mu m$ . Tyto malé částice jsou méně ovlivněny gravitační silou, setrvávají suspendované v ovzduší velmi dlouho, díky čemuž mohou být transportovány a rozptýleny na vzdálenosti až stovek kilometrů. Tento fakt ovlivňuje možnost monitorování ovzduší v dané lokalitě, protože malé částice emitované určitým zdrojem mohou být odneseny do vzdálené oblasti, kde jsou potom zaznamenány při měření imisí namísto původní oblasti. Hrubé částice vznikají primárně při nekontrolovaném spalování nebo při rozvíření již usazených částic díky věttru či dopravě na nezpevněných komunikacích. Tyto částice rychle sedimentují a tedy nemohou být unášeny na takové vzdálenosti [11].

**Oxidy dusíku** obecně značíme jako  $NO_x$ . Pod toto souhrnné značení patří oxid dusný ( $N_2O$ ), dusnatý ( $NO$ ), dusičitý ( $NO_2$ ) a dusičný ( $N_2O_5$ ). Oxidy dusíku se do atmosféry dostávají převážně díky dopravě a ze spalovacích procesů, především z velkých zdrojů. V atmosféře jsou poté součástí mnoha chemických procesů, přeměňují se na kyselinu



dusičnou, která následně reaguje s prachovými částicemi, podílí se také na vzniku přízemního ozonu. Dusičnanové ionty, které jsou poté z atmosféry odstraňovány srážkovou činností a sedimentací, se usazují v půdě a dostávají se do vod, kde představují riziko pro ryby a vodní rostliny [11].

**Oxid siričitý ( $\text{SO}_2$ )** se dostává do ovzduší při spalování sirnatých paliv a vulkanické činnosti. V ovzduší oxiduje se vzdušným kyslíkem a spolu vytváří kyselinu sírovou, která je spolu s kyselinou siřičitou příčinou kyselých dešťů. Ty z půdy uvolňují kovové ionty, znehodnocují kvalitu vody a poškozují mikroorganismy, to z nich dělá velké riziko pro lesní porosty, průmyslové rostliny a ryby. Kyselé deště mají také vliv na rozpouštění některých druhů zdiva a zvětrávání kamene, v jejichž důsledku byly zaznamenány poškození zejména historických staveb [11].

**Ozon ( $\text{O}_3$ )** se nachází z převážné většiny (90 – 95 %) ve stratosféře mezi 20 – 30 km nad zemským povrchem. Zde zabraňuje životu nebezpečnému ultrafialovému záření od Slunce. Avšak přízemnímu ozonu jsou přičítány četné nepříznivé účinky na lidské zdraví a na životní prostředí. Vdechování ozonu může vyvolat pokles kapacity plic a vznik zánětlivých onemocnění plic, poškozují také rostlinná pletiva. V atmosféře vzniká jako sekundární znečišťující látka působením slunečního záření na oxidy dusíku spolu s kyslíkem a těkavými organickými látkami [11].

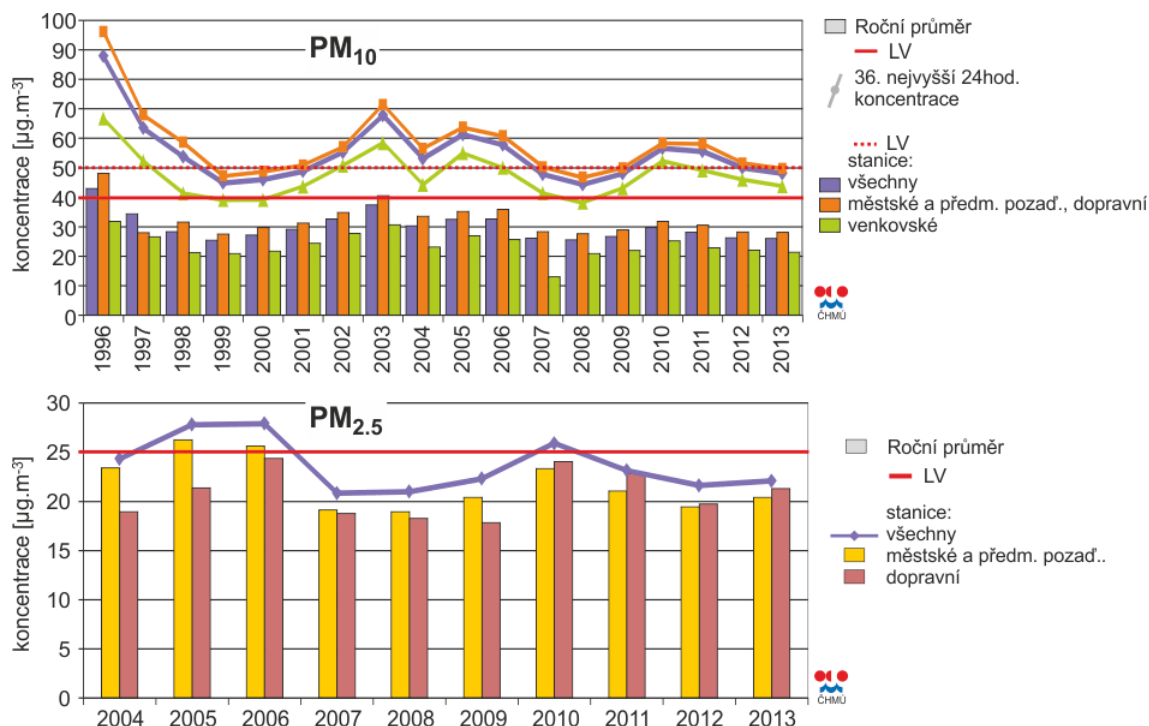
### 3.2. Ovzduší v ČR

V počátcích 70. let minulého století patřilo tehdejší Československo mezi nejvíce znečištěná místa Evropy, dle údajů OSN bylo v tomto období například na 3. místě v míře znečištění  $\text{SO}_2$ . Stalo se tak hlavně energetickým programem, který stavěl primárně na fosilních palivech, nejčastěji na hnědém uhlí. V počátcích se sledovaly pouze TZL a oxid siřičitý, až o několik let později se začaly monitorovat také oxidy dusíku. [1] Postupně byl sledován zvýšený výskyt alergií a nemocí kardiovaskulárních cest. Tento přímý dopad na zdraví byl jedním z podnětů pro zpřísnění emisí pomocí instalací odlučovačů a regulací pomocí komínového zákona, který finančně postihoval vypouštění znečišťujících látek do ovzduší.

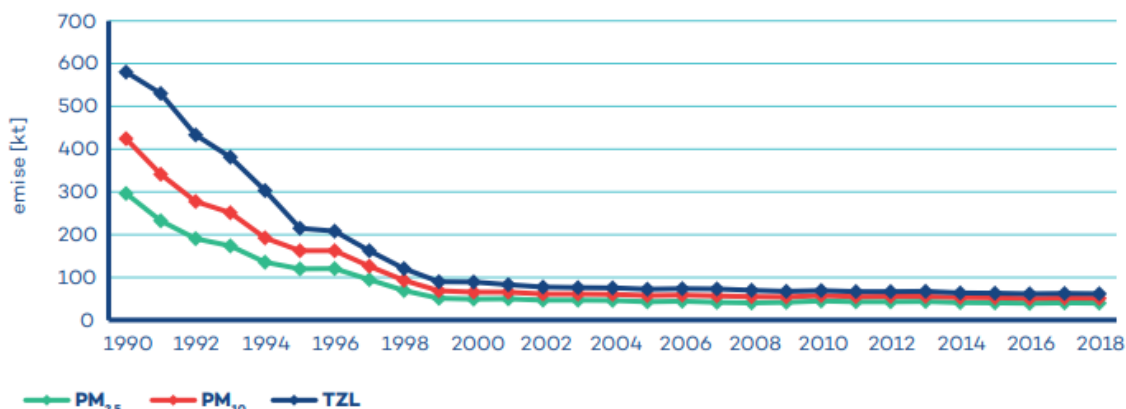
Počátky 80. let znamenaly pro oblast Československa nejvyšší zaznamenanou imisní zátěž. Ta způsobila poškození lesů, které musely být následně odtěženy. Byl vybudován první systém regulace velkých zdrojů znečišťování ovzduší. [1] Studie spojovaly zdroje znečišťování (spalovací procesy, doprava) s častějším výskytem onemocnění dýchacích cest, zvýšení chronických onemocnění plic a zvýšená úmrtnost v důsledku srdečně-cévní a plicní onemocnění. [3] U obyvatelstva rostlo povědomí o znečišťování ovzduší, což vyústilo koncem 80. let v Ekologické demonstrace začínající v Ústeckém kraji.

Z následujících grafů lze vidět, že v devadesátých letech došlo ke značnému snížení koncentrace částic  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$ . Toto zlepšení bylo primárně zavedením přísnějších

opatření v oblasti průmyslu a energetiky. Začaly se také nově měřit frakce  $PM_{2,5}$ , přízemní ozón a vybrané organické látky. Z důvodu vyššího rizika malých částic na lidské zdraví se později začínají sledovat i frakce  $PM_1$  a menší částice.



Obrázek 6: Trendy ročních charakteristik  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  v České republice, 1996-2013 [12]



Obrázek 7: Vývoj celkových emisí částic v České republice, 1990-2018 [12]

## 4. Legislativa k ochraně životního prostředí

V současné době je řídicím právním předpisem zabývajícím se ochranou ovzduší zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, účinný od 13.6.2012. Nahradil tak do té doby platný zákon č. 86/2002 Sb. Zákon byl několikrát novelizován, aby promítal změny v energetice, ochraně ovzduší a jeho monitorování. Poslední novelou tohoto zákona je zákon č. 403/2020 Sb., který se zaměřuje na urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury. Předchozí novely upravovaly mimo jiné formální změny ve

znění zákona, požadavky pro stacionární zdroje na kapalná nebo plynná paliva o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším či doplnění změn ze Směrnic Rady (EU). [13]

Součástí zákona o ochraně ovzduší jsou dvě vyhlášky, zabývající se vyhodnocováním úrovně znečištění a přípustných imisních a emisních úrovní. Jedná se o vyhlášku č. 330/2012 Sb., hovořící o způsobu a podmínkách posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění. Druhou je vyhláška č. 415/2012 Sb., která stanovuje přípustné úrovně znečištění, tedy emisní limity. Stanovuje také metody a postupy pro měření emisí. [13] Součástí zákona o ochraně ovzduší jsou také například předpisy stanovující požadavky na kvalitu paliv používaných pro vnitrozemská a námořní plavidla z hlediska ochrany ovzduší, či nařízení o stanovení pravidel pro zařazení silničních motorových vozidel do emisních kategorií a o emisních plaketách.

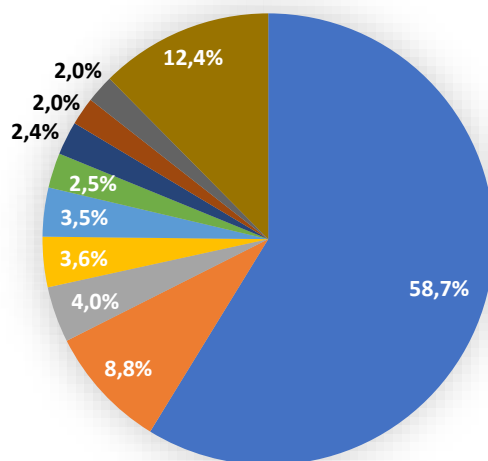
## 4.1. Emisní limity

Emisními limity rozumíme maximální přípustné množství znečišťující látky vypouštěné do ovzduší, tuto mez upravuje vyhláška číslo 415/2012 Sb. Protože vyhláška stanovuje rozdílné hodnoty v závislosti na použitém palivu, technologickém postupu či výkonu zařízení, určení takového limitu je značně obtížné. Vyhláška taktéž určuje, za jakých podmínek a jakým způsobem se emisní hodnoty musí měřit. Rozlišují se emisní limity obecné a specifické. Obecné jsou stanoveny pro konkrétní znečišťující látky nebo jejich skupiny, specifické emisní limity stanovují meze pro stacionární zdroje. V příloze č. 2 k zákonu č. 201/2012 Sb. jsou rozděleny do 11 základních skupin, které se dále dělí na další podtřídy. Limity se uvádějí jako hmotnost znečišťující látky přítomné v metru krychlovém vzduchu za normálních podmínek, tedy teploty 273,15 K a tlaku 101 325 Pa. Tato hmotnostní koncentrace je určena jako průměr z určitého měřeného úseku, který se liší pro každou měřenou látku [13].

Tabulka 1: Obecné emisní limity [14]

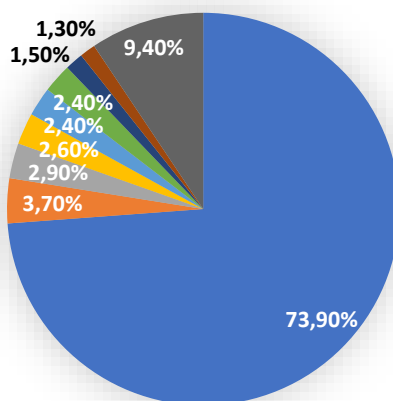
Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg/m <sup>3</sup> ]
Tuhé znečišťující látky	≤2500	200
	>2500	150
Oxidy síry vyjádřené jako oxid siřičitý	>20000	2500
Oxidy dusíku vyjádřené jako oxid dusičitý	>10000	500
Oxid uhelnatý	>5000	500
Organické látky vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)	>3000	150
Amoniak a soli amonné vyjádřené jako amoniak	>500	50
Sulfan	>100	10
Sirouhlík	>100	20
Chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
Fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	>100	10

Z každoročního vyhodnocení dat z měření ovzduší od ČHMÚ vyplývá, že největší podíl na tvorbě TZL má lokální vytápění domácností a to u částic PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>. U částic PM<sub>10</sub> mají velký podíl polní práce a veřejná energetika, u částic PM<sub>2,5</sub> je to opět veřejná energetika a zemědělství. Z grafů na obrázku č. 8 a 9 lze vidět podrobnější data z roku 2018.



- Lokální vytápění domácností
- polní práce
- veřejná energetika a výroba tepla
- Fugitivní emise z pevných paliv: Těžba a manipulace s uhlím
- Silniční doprava: Otěry pneumatik a brzd
- Ostatní zdroje
- Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní zdroje
- Silniční doprava: Osobní automobily
- Těžba nerostných surovin (mimo uhlí)
- Ostatní

Obrázek 8: Podíl sektorů na celkových emisích PM<sub>10</sub> v roce 2018 [12]



- Lokální vytápění domácností
- veřejná energetika a výroba tepla
- Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní zdroje
- Silniční doprava: Osobní automobily
- Silniční doprava: Otěry pneumatik a brzd
- Ostatní zdroje
- Těžba nerostných surovin (mimo uhlí)
- Silniční doprava: Abrazivní vozovky
- Ostatní

Obrázek 9: Podíl sektorů na celkových emisích PM<sub>2.5</sub> v roce 2018 [12]

## 4.2. Imisní limity

Jako imise označujeme nežádoucí látky již obsažené v ovzduší. Imise vyjadřují koncentrace TZL, imisní limit tedy označuje nejvyšší možnou přípustnou hodnotu koncentrace dané látky. Zpravidla se uvádí v mikrogramech určité znečišťující látky na metr krychlový venkovního vzduchu a to při normální teplotě a tlaku. Při určování limitů je důležitým parametrem doba průměrování, která odlišuje krátkodobé koncentrace od dlouhodobých. U některých látek se také připouští určitý počet překročení daného imisního limitu.

Imisní limity upravuje stejný zákon jako limity emisní, a to zákon č. 201/2012 Sb. Zákon rozlišuje limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí, pro ochranu ekosystémů a vegetace, pro celkový obsah znečišťujících látek v částicích PM<sub>10</sub> pro ochranu zdraví a pro troposférický ozon. V následujících tabulkách 2, 3 a 4 jsou znázorněny vybrané limity ze zmiňovaného zákona.

Tabulka 2: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [13]

Znečišťující látka	Chemická značka	Doba průměrování	Imisní limit [µg/m <sup>3</sup> ]	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	1 hodina	350	24
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	24 hodin	125	3
Oxid dusičitý	NO <sub>2</sub>	1 hodina	200	18
Oxid dusičitý	NO <sub>2</sub>	1 kalendářní rok	40	0
Oxid uhelnatý	CO	Maximální denní osmihodinový průměr	10000	0
Benzen		1 kalendářní rok	5	0
Částice PM <sub>10</sub>		24 hodin	50	35
Částice PM <sub>10</sub>		1 kalendářní rok	40	0
Částice PM <sub>2,5</sub>		1 kalendářní rok	20	0
Olovo		1 kalendářní rok	0,5	0

Tabulka 3: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [13]

Znečišťující látka	Chemická značka	Doba průměrování	Imisní limit [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	Kalendářní rok a zimní období (1. října – 31. března)	20
Oxidy dusíku	NO, NO <sub>2</sub>	1 kalendářní rok	30

Tabulka 4: Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM<sub>10</sub> vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [13]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit [ $\text{ng}/\text{m}^3$ ]
Arsen	1 kalendářní rok	6
Kadmium	1 kalendářní rok	5
Nikl	1 kalendářní rok	20
Benzo(a)pyren	1 kalendářní rok	1

Rok 2020 byl z hlediska kvality ovzduší výjimečný. Český hydrometeorologický ústav hodnotí kvalitu ovzduší za rok 2020 jako „velmi dobrou až dobrou“, tohoto výsledku bylo dosaženo z několika důvodů. Prvním z nich byly příznivé meteorologické podmínky: dobré rozptylové podmínky, dostatek srážek, mírnější léto, díky kterému byla nižší koncentrace přízemního ozonu a také díky teplé zimě se snížila intenzita vytápění. Dlouhodobé snižování emisí vyměňováním starých kotlů, zlepšování průmyslových procesů a obměnou vozového parku. V neposlední řadě se na výsledku podílelo i vyhlášení nouzového stavu po dobu téměř celého roku, čímž se snížila intenzita dopravy. Koncentrace TZL v roce opět poklesly a za hodnocené období 2010 – 2020 dosáhly svého minima. Některé imisní limity poprvé v historii měření nebyly překročeny, konkrétně NO<sub>2</sub> průměrované za 1 hodinu i za 1 kalendářní rok, podruhé v historii měření potom nebylo překročeno limitu pro PM<sub>10</sub> průměrované za 1 kalendářní rok. Také nebyla poprvé na území celé ČR vyhlášena ani jedna smogová situace či regulace. [15]

### 4.3. Měření emisí TZL

Zjišťování a vyhodnocení úrovně znečišťování upravuje § 6 zákona č. 201/2012 Sb., podle něj jsou provozovatelé zdrojů znečištění povinni zjišťovat míru znečišťování. Toto měření se provádí buď kontinuálně nebo jednorázově. Kontinuální měření se používá u významných zdrojů, u menších se pak používá měření jednorázové v intervalech jednoho či tří let. Jednorázové měření se také musí používat u významných

zdrojů jako kontrola a kalibrace pro měření kontinuální. Pokud dostupné technické prostředky neumožňují zjistit skutečnou úroveň znečišťování, krajský úřad může rozhodnout, že úroveň znečišťování takového zdroje může být vypočtena. K tomuto může dojít také v případě, když zdroj vnáší do ovzduší těkavé organické látky nebo v případě záložních zdrojů energie [13].

Měření hmotnostní koncentrace TZL se provádí nejčastěji pomocí gravimetrické metody. Odpadní plyn ze zdroje je spolu s TZL vyfiltrován a hmotnostní koncentrace se potom vypočte jako rozdíl hmotnosti filtru před a po odběru ze vztahu (1): [11]

$$c_m = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (1)$$

Kde  $m_1$  hmotnost čistého filtru [g]  
 $m_0$  hmotnost filtru po odběru [g]  
 $V$  objem odsátého plynu [m<sup>3</sup>]

#### 4.4. Měření imisí TZL

Měření imisí se podle zákona o ochraně ovzduší provádí a vyhodnocuje pro jistá území (zóny) a městské aglomerace s počtem obyvatel vyšším než 250 000. Seznam těchto zón a aglomerací je uveden v příloze č. 3. k zákonu o ochraně ovzduší. Ministerstvo životního prostředí za účelem stacionárního měření stanovilo státní síť imisního monitoringu a tuto síť provozuje. Síť vznikala postupně, v 70. a 80. letech minulého století byl měřen zejména SO<sub>2</sub> a pouze v oblastech s největším znečištěním (na obrázku č. 10 lze vidět lokality měření v roce 1970). Tato síť byla postupně rozšiřovaná o další měřicí stanice pro lepší sběr dat. Posuzování míry znečištění se provádí podle zákona stacionárním měřením, výpočtem nebo jejich kombinací. Metoda použitá pro posuzování záleží na tom, zda došlo v zóně či aglomeraci k překročení dolní nebo horní meze pro posuzování úrovně znečištění. Měření imisí probíhá obdobnými metodami jako při měření emisí, jen s tím rozdílem, že naměřené koncentrace jsou mnohem nižší. Síť měřících stanic má na starosti Český hydrometeorologický ústav, který data dále i zpracovává a archivuje. Každoročně zveřejňuje na svých webových stránkách vyhodnocení stavu ovzduší za uplynulý rok [13].





Obrázek 10: Lokality měření imisí v roce 1970 [12]

## 5. Metody pro měření TZL

Při měření odpadních látek je nutné nejdříve zhodnotit měřený vzorek a znát alespoň jeho základní vlastnosti, které se odvíjejí z charakteru výroby nebo děje, při kterém dochází ke vzniku emisí. Metody měření jsou založeny na dvou základních principech, které volíme podle zjištěných vlastností [11].

Při **extraktivním způsobu** odebíráme měřený vzorek mimo místo, kde se vyskytuje. Odebírání probíhá nejčastěji čerpáním, při kterém se obvykle odstraňuje vodní pára a zbylé částice a plyn vedeme buď do analyzátoru, ve kterém analyzujeme přítomný plyn, nebo do filtru umístěného ve vyhřívané sondě, poté měříme TZL.

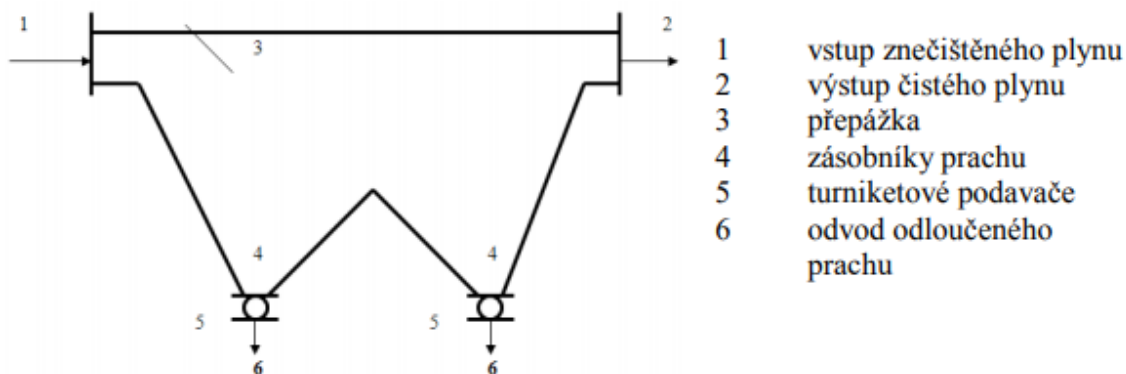
**Neextraktivní způsob měření (in – situ)** spočívá v umístění analyzátoru přímo do komína či potrubí, kde je měřicí čidlo v bezprostředním styku s měřeným vzorkem. Výhodou této metody je okamžité získání přesných dat. Také tím odpadá odběr, doprava a úprava odebraného vzorku a s nimi spojené nejistoty měření.

Při měření aerosolů jsou nejčastěji sledovanými veličinami velikost, tvar, koncentrace, hmotnost či chemické složení suspendovaných částic. Výsledkem měření nejčastěji bývá hmotnostní koncentrace nebo početní zastoupení v různých velikostních třídách (PM<sub>x</sub>). Způsob měření je závislý na zkoumaném vzorku, rozeznáváme několik základních metod:

- Gravimetrická metoda
- Fotometrická metoda
- Vzorkování podle elektrické mobility
- Radiometrická metoda
- Mikroskopie

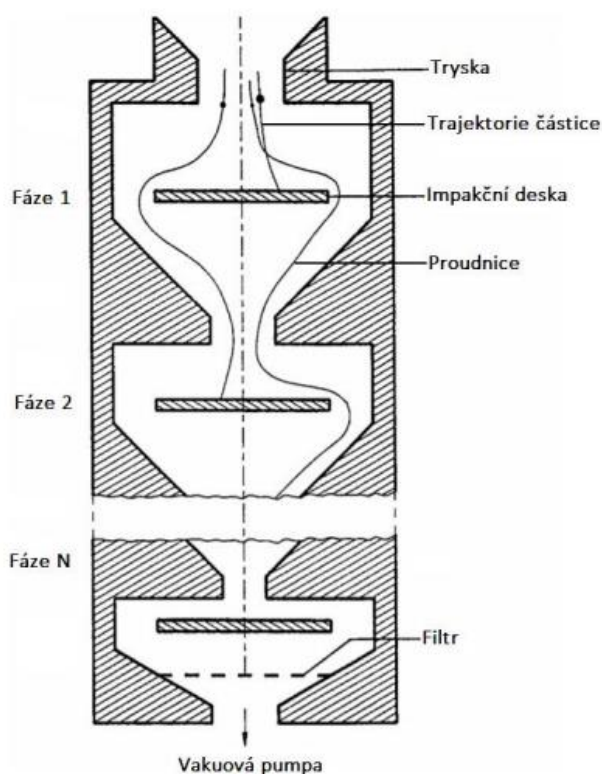
### 5.1. Gravimetrická metoda

Jedná se o jednu z nejzákladnějších metod využívanou při zkoumání částic. Nejčastěji využívána při jednorázovém extraktivním způsobu měření plynů. Výstupem této metody je nejčastěji hmotnostní koncentrace vypočtena jako rozdíl hmotnosti filtru před a po odběru. Základními nástroji jsou odběrová sonda, zachycovač, chladič, průtokoměr a zdroj sání. Gravimetrie je základní metodou využívanou při posuzování stavu ovzduší, také se používá jako kalibrační metoda pro automatické měřicí přístroje pro kontinuální měření. Nejjednodušším zařízením využívající gravimetrickou metodu je usazovací komora. Průřez komory je často několikanásobný průřezu transportnímu potrubí, čímž se výrazně sníží rychlost proudění. Díky nízké rychlosti převažují gravitační síly nad unášivými silami, díky čemuž jsou částice tříděny podle velikosti.



Obrázek 11: Usazovací komora

Impaktory jsou jedny z nejběžněji používaných nástrojů při měření aerosolů. Sestavou postupně zužujících se impaktorů prochází měřený vzorek, který se postupně filtruje na požadovaných fázích. Těmto sestavám říkáme kaskádové impaktory a jsou jednou z nejpoužívanějších metod pro měření hmotnostní distribuce. Filtrování využívá setrvačnost samotných částic. Velké částice, které mají vyšší setrvačnost, nestihnou změnit směr rychlosti spolu s proudem a narazí tak na filtr fáze pro danou velikostní třídu.



Obrázek 12: Kaskádový impaktor

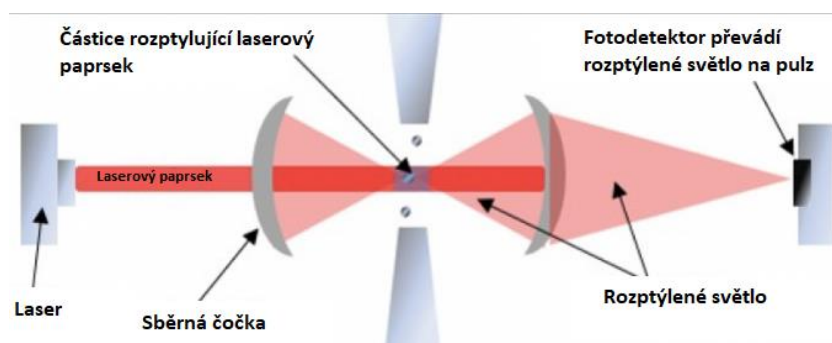
Při použití vícestupňových impaktorů lze dosáhnout velmi jemného roztržení částic, v tabulce č. 4 jsou zaneseny hodnoty pro jednotlivé stupně profesionálního impaktoru DEKATI DLPI+, se kterým byl porovnán impaktor navrhovaný v této práci. Ten na 14 stupních odděluje částice od  $PM_{10}$  do  $PM_{0,15}$ , díky čemuž získáme velmi podrobná data

o měřeném vzorku. Impaktory udávají velikosti odlučovaných částic jako průměr  $D_{50}$ , jedná se o velikost částice, která se s 50 % účinností odloučí na daném stupni.

## 5.2. Fotometrická metoda

Tato metoda využívá optické vlastnosti částic v měřeném vzorku. Ty jsou příčinou atmosférických jevů jako jsou například červánky při západu slunce, modrá barva oblohy či snížená viditelnost při zvýšeném znečištění ovzduší. Světlo s určitou vlnovou délkou narazí na částici a může se buď odrazit nebo je absorbované částicí, při čemž dojde k přeměně její energie na teplo. Nejčastěji dochází k částečné absorpci a částečnému odrazu světla. Poměr, v jakém dojde k těmto jevům, závisí na vlnové délce světla a na vlastnostech částice, jako je chemické složení nebo tvar.

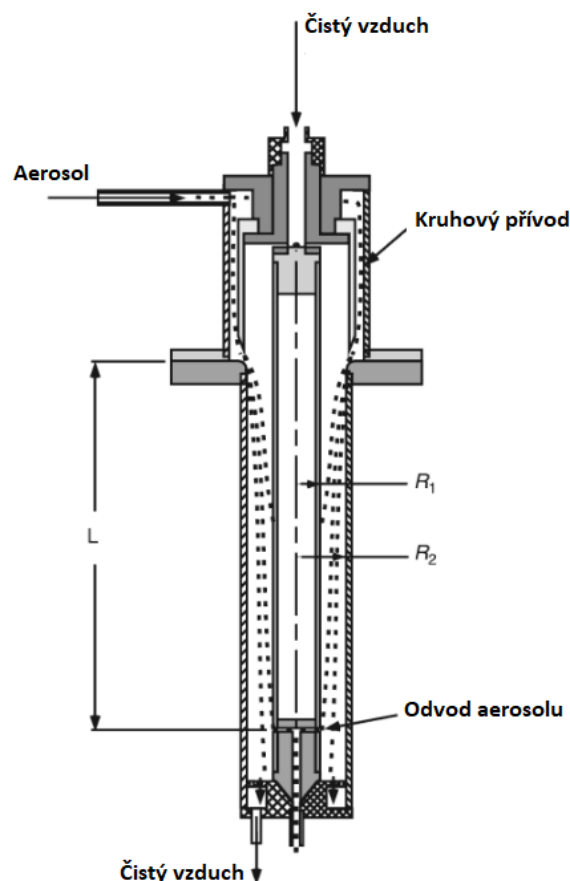
Metoda využívá zdroj světla, který je přerušován částicemi v měřeném vzorku. Laserový paprsek dopadající na částici se rozptýlí a tyto pulzy rozptýleného světla jsou následně zaznamenány detektory. Zařízení vyhodnocuje počet pulzů, čímž měří počet částic. Na základě intenzity rozptylu světla vyhodnocuje velikost částic. Výhodou této metody je vysoká přesnost měření a okamžité výsledky, díky čemuž je metoda vhodná i pro neextraktivní in-suit měření.



Obrázek 13: Fotometrická metoda

## 5.3. Vzorkování podle elektrické mobility

Principem této metody je nabití měřeného vzorku nábojem a následné třídění částic v oblasti elektrostatického pole. Kladně nabité částice jsou přitahovány k záporným elektrodám a naopak. Velikost síly závisí na intenzitě pole a velikosti náboje částice. Velké částice jsou těmito silami ovlivněny méně, díky čemuž je vzorek rozdělen do velikostních tříd.



Obrázek 14: Vzorkování podle elektrické mobility

## 5.4. Radiometrická metoda

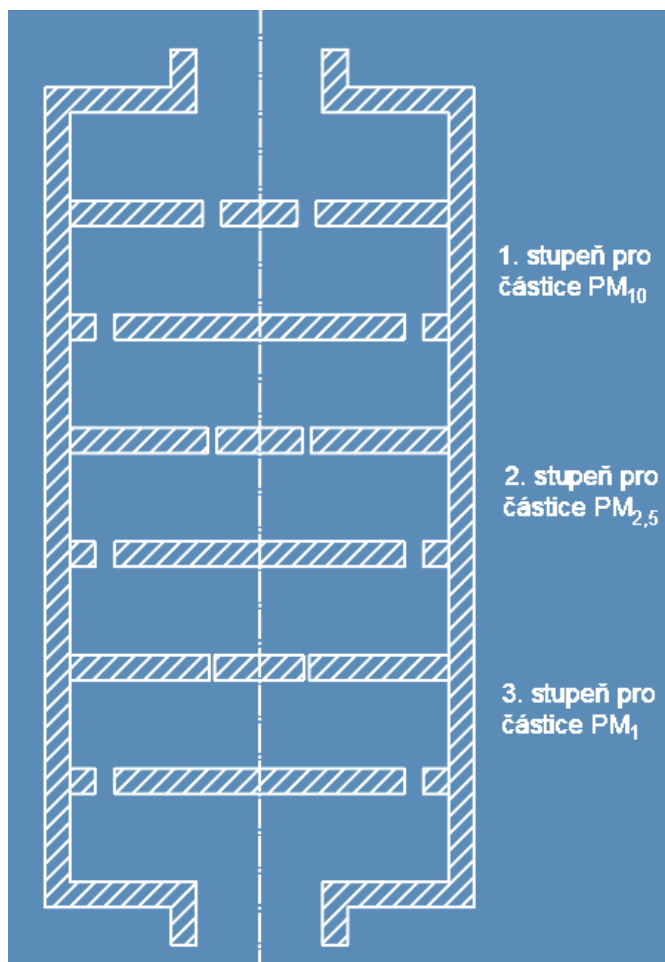
Při měření pomocí radiometrické metody prochází měřený vzorek, podobně jako u gravimetrické metody, filtrem. Hmotnostní koncentrace ale není vyhodnocena z hmotnostního rozdílu filtru, ten je prozařován paprsky  $\beta$  – záření, které dopadá na detektor umístěn za filtr. Koncentrace částic je vyhodnocena z intenzity záření. Výhodou této metody je snadná automatizace, možnost použití pro jednorázové i kontinuální měření a přesnost měření.

## 5.5. Mikroskopie

Používá se pro podrobné zkoumání částic. S velkou přesností lze měřit velikost, tvar a také zkoumat strukturu částice. Při použití elektronových mikroskopů lze takto zkoumat i částice v řádech nanometru ( $PM_{0,1}$ ).

## 6. Návrh impaktoru

Tato kapitola je věnována návrhu třístupňového impaktoru pro měření částic  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$ . Impaktor by měl pracovat s objemovým průtokem 20 l/min a být vhodný i pro měření spalin, tedy aby odolával teplotám do 200 °C. Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma navrhovaného impaktoru.



Obrázek 15: Schéma navrhovaného impaktoru

### 6.1. Výpočetní postup

Výpočty impaktoru se řídí matematickým modelem Virgila A. Marpla [16]. Ten se odlučováním částic a jejich měřením zabýval ve své doktorské práci. Při návrhu jednotlivých stupňů se využívá bezrozměrného podobnostního čísla  $Stk$ . Jedná se o odlučovací vlastnosti jednotlivých trysek, toto číslo bylo pojmenováno po spoluautorovi pohybové rovnice vazké tekutiny Georgi Gabrieli Stokesovi, tedy Stokesovo číslo. V následujícím matematickém zápisu v rovnici (2) je  $Stk$  definováno jako poměr setrvačného doběhu částice a charakteristického rozměru překážky:

$$Stk = \frac{\rho_{\check{c}} \cdot C \cdot D_{\check{c}}^2 \cdot v}{18 \cdot \eta \cdot \frac{D}{2}} \quad (2)$$

kde:

$\rho_{\check{c}}$	Hustota částice [kg/m <sup>3</sup> ]
$C$	Cunnighamův korekční součinitel na skluz [-]
$D_{\check{c}}$	Průměr částice [m]
$\eta$	Dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]
$D$	Průměr trysky [m]
$v$	Rychlost proudění [m/s]

Do vztahu (2) pro Stokesovo číslo vstupuje rychlost proudění  $v$ , pro následující výpočty vycházím ze vztahu (3) a pracuji s objemovým průtokem namísto rychlosti proudění.

$$v = \frac{\dot{V} \cdot 4}{n \cdot \pi \cdot D^2} \quad (3)$$

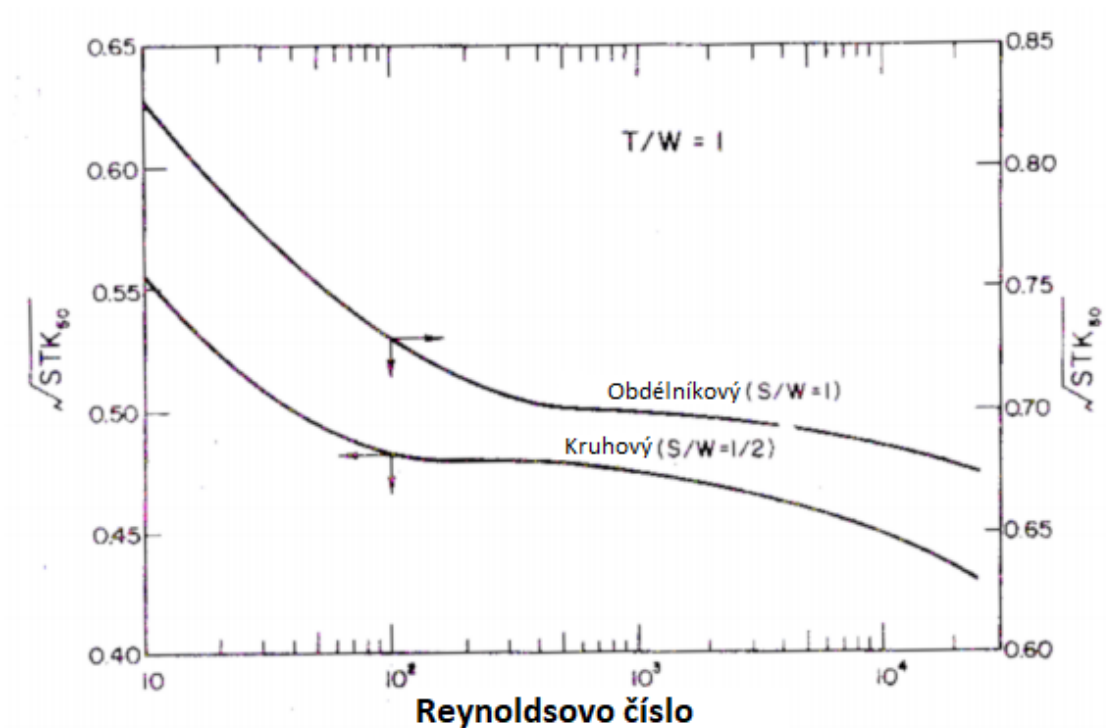
kde:

$\dot{V}$	Objemový průtok stupněm [m <sup>3</sup> /s]
$n$	Počet trysek ve stupni [-]

Následným dosazením objemového průtoku stupněm ze vztahu (3) do vztahu pro Stokesovo číslo (2) a úpravou vzorce získáme vztah (4) pro výpočet průměru trysky.

$$D = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\check{c}} \cdot \dot{V} \cdot D_{\check{c}}^2 \cdot 4 \cdot C}{9 \cdot \eta \cdot \pi \cdot n \cdot Stk}} \quad (4)$$

Graf na obrázku č. 16 znázorňuje závislost Stokesova čísla na Reynoldsovo číslu. Lze vidět, že  $Stk$  je téměř konstantní pro  $v$  v určitém intervalu  $Re$ . Pro zjednodušení výpočtu se dále uvažuje odmocnina  $Stk$  v intervalu  $Re \in (500,3000)$  rovna 0,48.



Obrázek 16: Stokesovo číslo v závislosti na Reynoldsovo čísle [16]

Dynamická viskozita pro suchý vzduch je vyjádřena ve vztahu (5), je funkcí teploty.

$$\eta = 1,717 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15} \cdot \frac{1 + \frac{113}{273,15}}{1 + \frac{113}{T}}} \quad (5)$$

kde:

$T$  Termodynamická teplota vzduchu [K]

V následujícím vztahu (6) je popsán Cunninghamův korekční součinitel na skluz. Tento součinitel upravuje rovnice pro výpočet aerodynamického odporu platíci pro spojitě prostředí, tak aby platily i pro klouzání plynu podél povrchu.

$$C = 1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{D_{\zeta}} \cdot \left[ 1,23 + 0,41 \cdot \exp \left( -0,88 \cdot \frac{D_{\zeta}}{2 \cdot \lambda} \right) \right] \quad (6)$$

kde:

$\lambda$  Střední volná dráha molekul [m]

$D_{\zeta}$  Průměr částice [m]



Střední volná dráha molekul  $\lambda$  je funkcí tlaku, teploty a složení plynu. Největší vliv na ní má tlak. Při výpočtu uvažuji, že při odebrání vzorku je v impaktoru přibližně atmosférický tlak, pro zjednodušení výpočtu dále uvažuji konstantní hodnotu  $\lambda = 0,065 \mu\text{m}$ . Tato úvaha platí pro vzduch a spaliny běžného složení. Hodnoty Cunninghamova korekčního součinitele roste se zmenšující se velikostí částice, čehož si můžeme všimnout v následující kapitole v tabulce č. 5. Pro měřenou frakci  $\text{PM}_{10}$  je Cunninghamův korekční součinitel téměř zanedbatelný.

Navrhovaný impaktor má pracovat s průtokem v intervalu 10 – 30 l/min a s teplotami v rozmezí 0 – 200 °C. Při výpočtu trysek uvažuji dynamickou viskozitu pro teplotu 23 °C a objemový průtok 1,4 m<sup>3</sup>/h. Nyní pro výpočet průměru trysky ze vztahu (4) chybí pouze počet trysek  $n$ . Tento počet volím tak, aby Reynoldsovo číslo, definované ve vztahu (6), vycházelo v již definovaném intervalu  $\text{Re} \in (500, 3000)$ .

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (7)$$

kde:

$\rho$	Hustota tekutiny [kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Rychlost proudění [m/s]
$D$	Průměr trysky [m]
$\eta$	Dynamická viskozita [Pa·s]

K výpočtu Reynoldsova čísla je zapotřebí získat hustotu vzduchu  $\rho$  ze stavové rovnice ideálního plynu ze vztahu (8). Pro výpočet uvažuji tlak vzduchu 98 kPa, zde opět dochází ke zjednodušení, protože zanedbávám ztráty na jednotlivých stupních.

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (8)$$

kde:

$p$	Tlak vzduchu [Pa]
$r$	Měrná plynová konstanta, pro vzduch $r = 287,1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$T$	Termodynamická teplota vzduchu [K]

## 6.2. Vypočtené hodnoty

Prvním krokem výpočtu byl Cunninghamův korekční součinitel, ten se vypočetl ze vztahu (6) a v tabulce č. 5 jsou hodnoty pro jednotlivé navrhované stupně.

Tabulka 5: Hodnoty Cunninghamova korekčního součinitele pro jednotlivé frakce

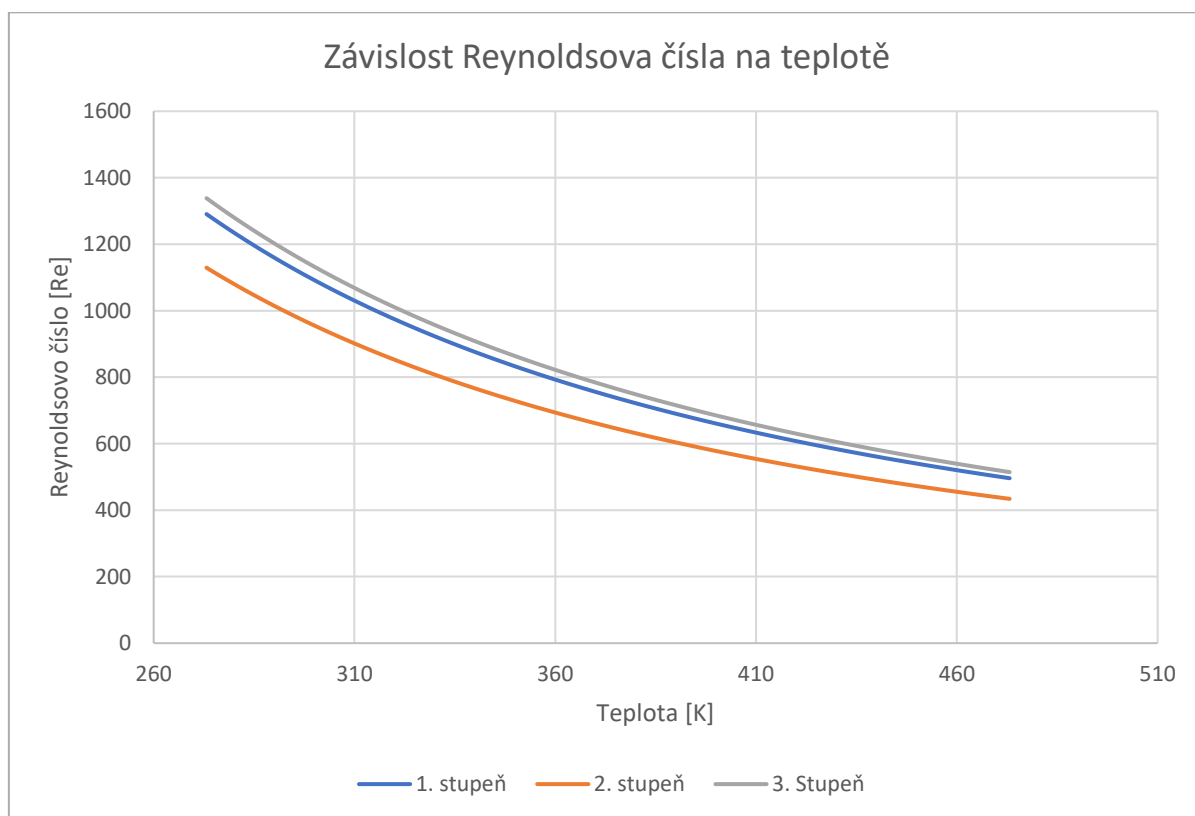
<b>PM<sub>x</sub> [μm]</b>	<b>C [-]</b>
10	1,01599
2,5	1,06396
1	1,15996

Nyní známe vše potřebné pro výpočet průměru trysek podle vztahu (4). Po výpočtu průměru trysek se vypočítal počet trysek na jednotlivých stupních. Při tomto výpočtu se kontrolovalo, zda Reynoldsovo číslo leží stále v intervalu, který se určil jako vhodný interval pro konstantní Stokesovo číslo. Při výpočtu průměru trysek se přihlíželo na možnosti výroby, průměry trysek byly zaokrouhleny a u 3. stupně byla zvolena varianta s nižším počtem trysek a větším průměrem, z důvodu snadnější výroby. V následující tabulce č. 6 jsou hodnoty pro velikost a počet trysek na jednotlivých stupních.

Tabulka 6: Počet a velikost trysek jednotlivých stupních

<b>Stupeň</b>	<b>Tříděná frakce</b>	<b>Počet trysek</b>	<b>Průměr trysek [mm]</b>
1	PM <sub>10</sub>	4	7
2	PM <sub>2,5</sub>	20	1,6
3	PM <sub>1</sub>	36	0,75

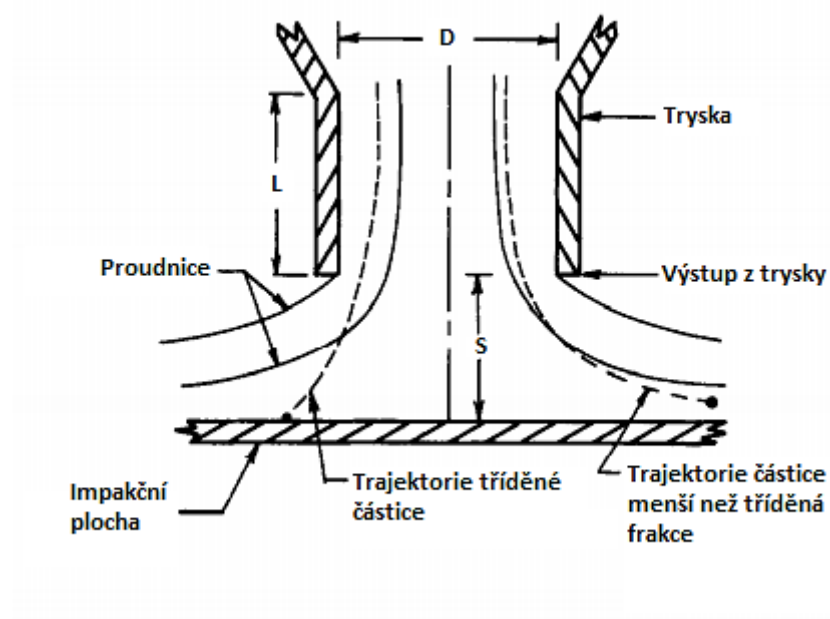
Následně byla provedena kontrola Reynoldsova čísla, které se mění s teplotou. Provozní teploty navrhovaného impaktoru jsou 0 – 200 °C, zkontrolovalo se tedy, zda je Re pro vypočtené stupně stále v požadovaném intervalu v tomto teplotním rozmezí. Tato závislost je zanesena v následujícím grafu.



Obrázek 17: Závislost Reynoldsova čísla na teplotě

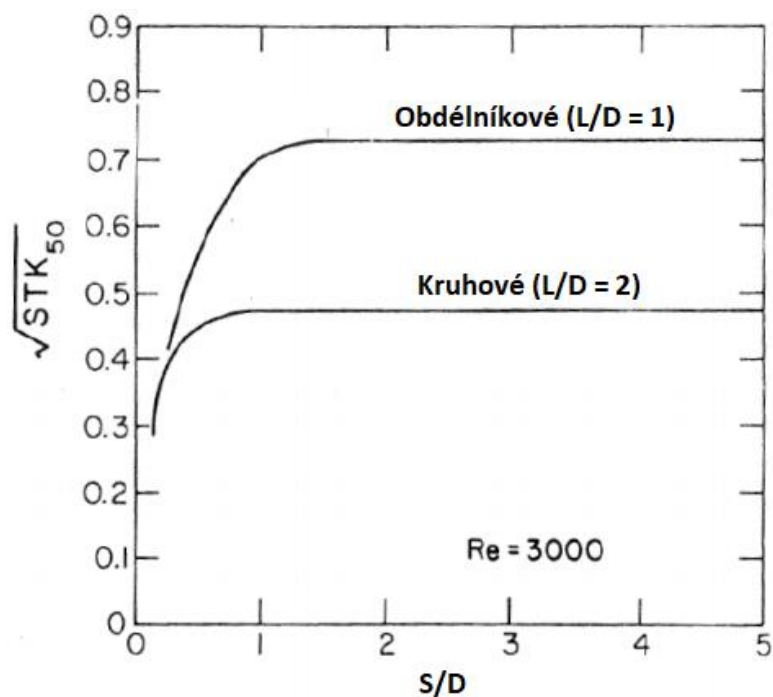
### 6.3. Konstrukce impaktoru

Pro správné odlučování částic je při konstrukci impaktoru nutné dodržet několik poměrů. Jedná se primárně o poměr mezi délkou trysky a jejím průměrem a poměr mezi délkou trysky a mezerou mezi koncem trysky a impakční plochou. Na následujícím obrázku (18) jsou tyto důležité rozměry znázorněny.



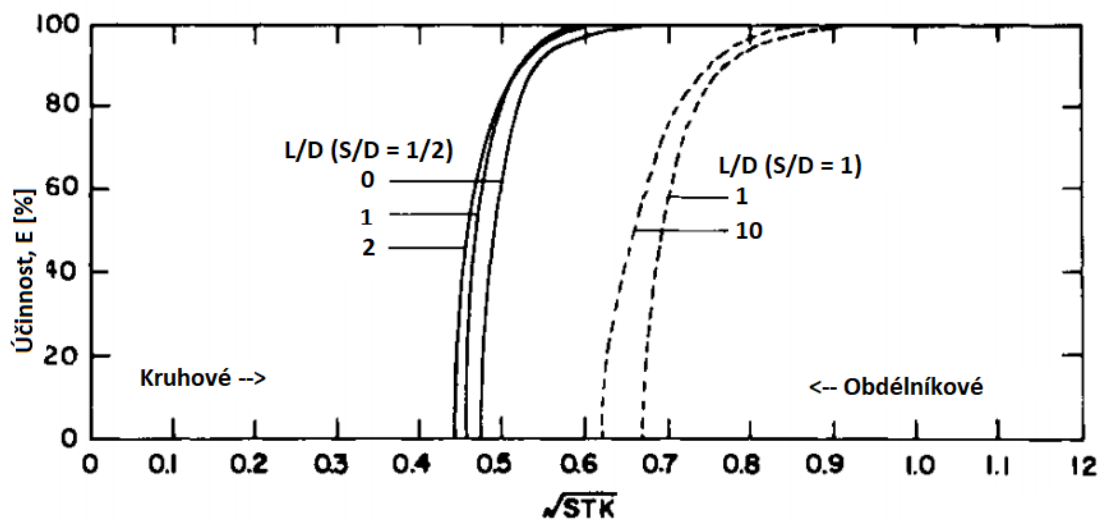
Obrázek 18: Řez stupněm impaktoru [16]

Podle testů Marpla a Willekeho [16] [17] je ideální pro impaktor poměr  $L/D = 1$  a  $S/L = 1$ . Mohou se ale pohybovat v intervalu  $L/D \in (1,5)$  a  $S/D \in (1,2)$ . Tyto rozměry jsou dále limitované možnostmi výroby a její přesnosti. Z následujícího obrázku (19) lze vidět závislost těchto poměrů na Stokesovo číslo.



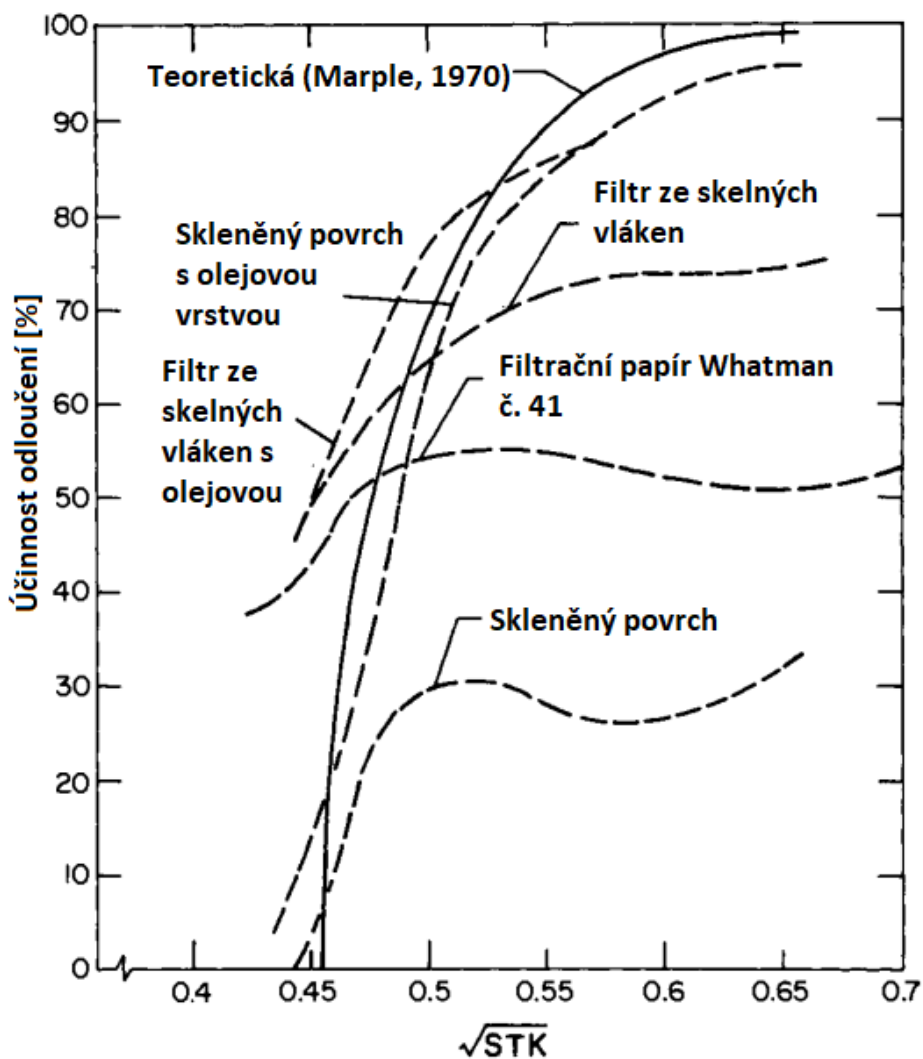
Obrázek 19: Vliv poměrů  $L/D$  a  $S/D$  na  $Stk$  [16]

Obrázek č. 20 znázorňuje vliv zmíněných poměrů na účinnost odlučování částic impaktorem.



Obrázek 20: Vliv poměrů  $L/D$  a  $S/D$  na účinnosti odlučování [16]

Dalším krokem byl návrh impakčních ploch, na kterých se částice usazují. Aby se zabránilo ztrátám v podobě odrazu částic, či strhnutí částic proudem, musí se plocha opatřit speciálním povrchem, který těmto ztrátám částečně zabraňuje. Obrázek č. 21 znázorňuje různé typy povrchů a jejich vliv na účinnost odlučování.



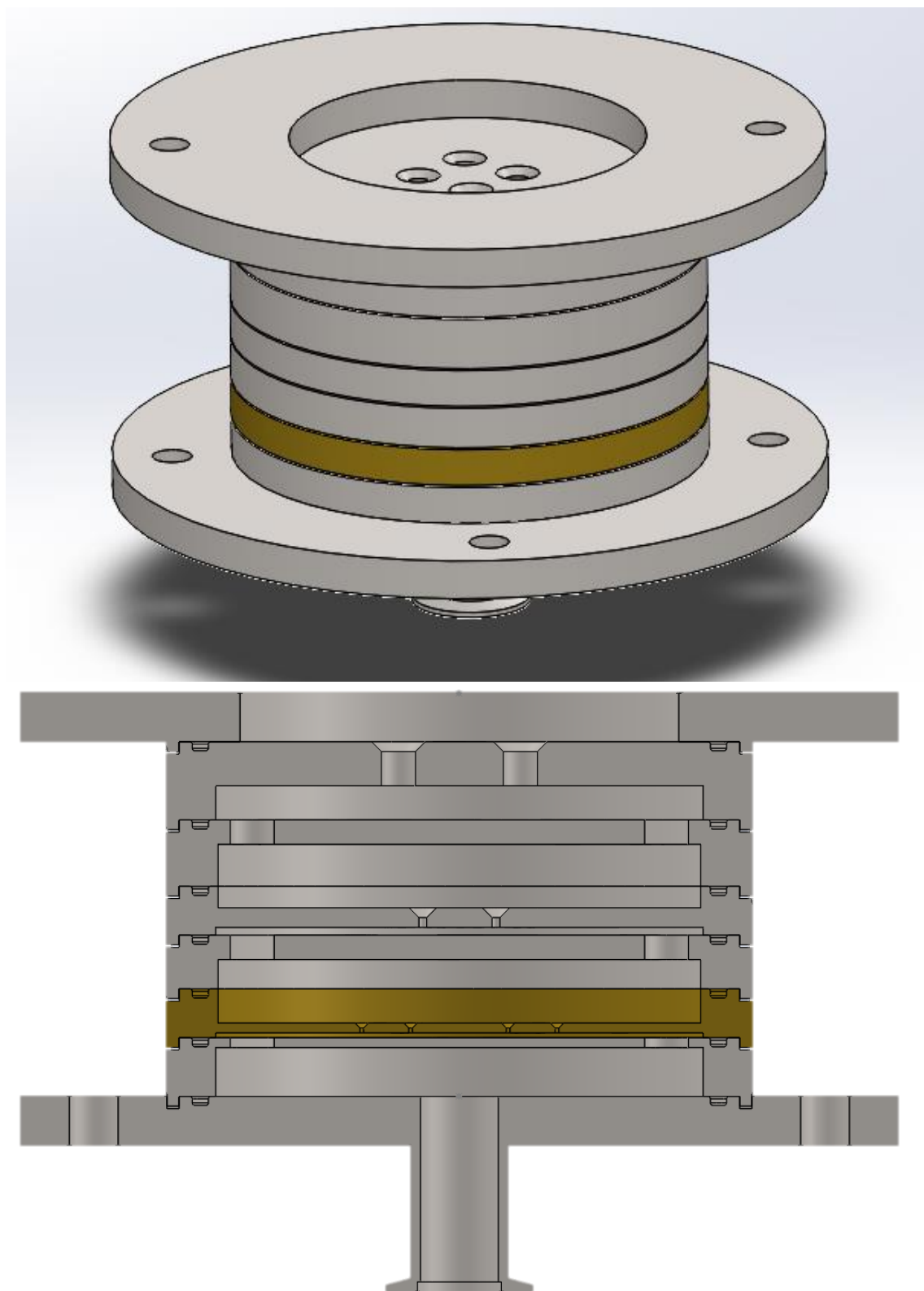
Obrázek 21: Vliv povrchu impakční plochy na účinnost odlučování [16]

Z obrázku č. 21 je vidět, že ideálním povrchem s nejvyšší účinností odlučování je skleněný povrch s olejovou vrstvou. Při manipulaci s impaktorem by tento materiál mohl představovat riziko, zároveň není ideální pro provozní teploty, pro které je impaktor navrhován. Tento návrh počítá s aluminiovou fólií. Po měření se fólie odejme a zváží se samostatně, při vážení celého kovového stupně, by mohlo docházet k nepřesnosti v důsledku citlivosti vah.

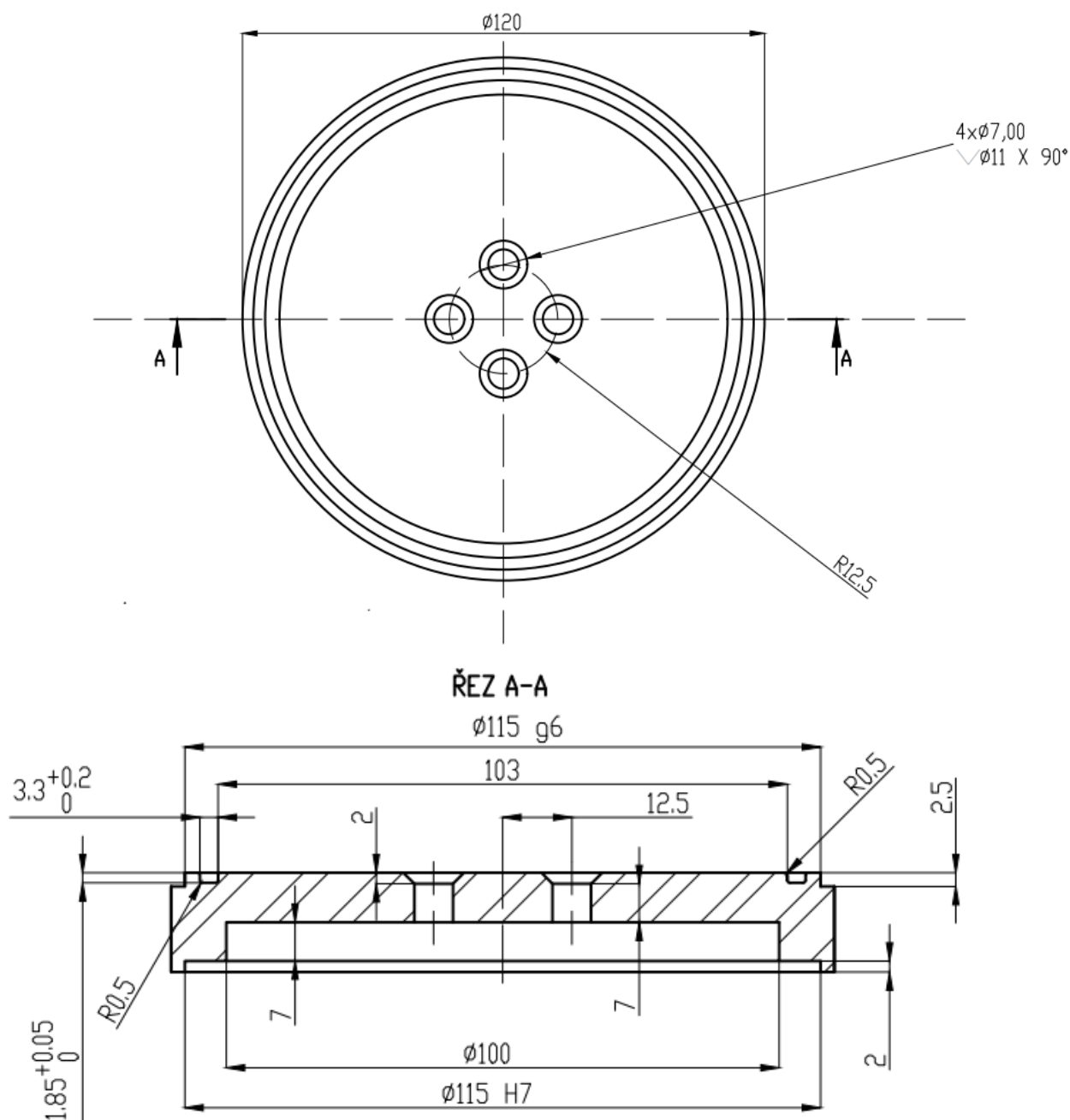
## 6.4. Výsledný impaktor

Výsledný impaktor se skládá ze 3 stupňů (třídící částice  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$ ), 3 impakčních ploch, spodního dílu a vrchního dílu. Konstrukce je stavěna tak, aby se impaktor mohl opatřit o další stupně, pro měření další frakce. Z výpočtové části byly získány důležité rozměry jako jsou průměr, počet a délka trysek na jednotlivých patrech, zbylé rozměry byly navrhuty tak, aby se dodržely důležité poměry zmíněné

v předchozích kapitolách. Na obrázku č. 22 lze vidět 3D model navrhovaného impaktoru, zvýrazněný díl je 3. stupeň impaktoru.



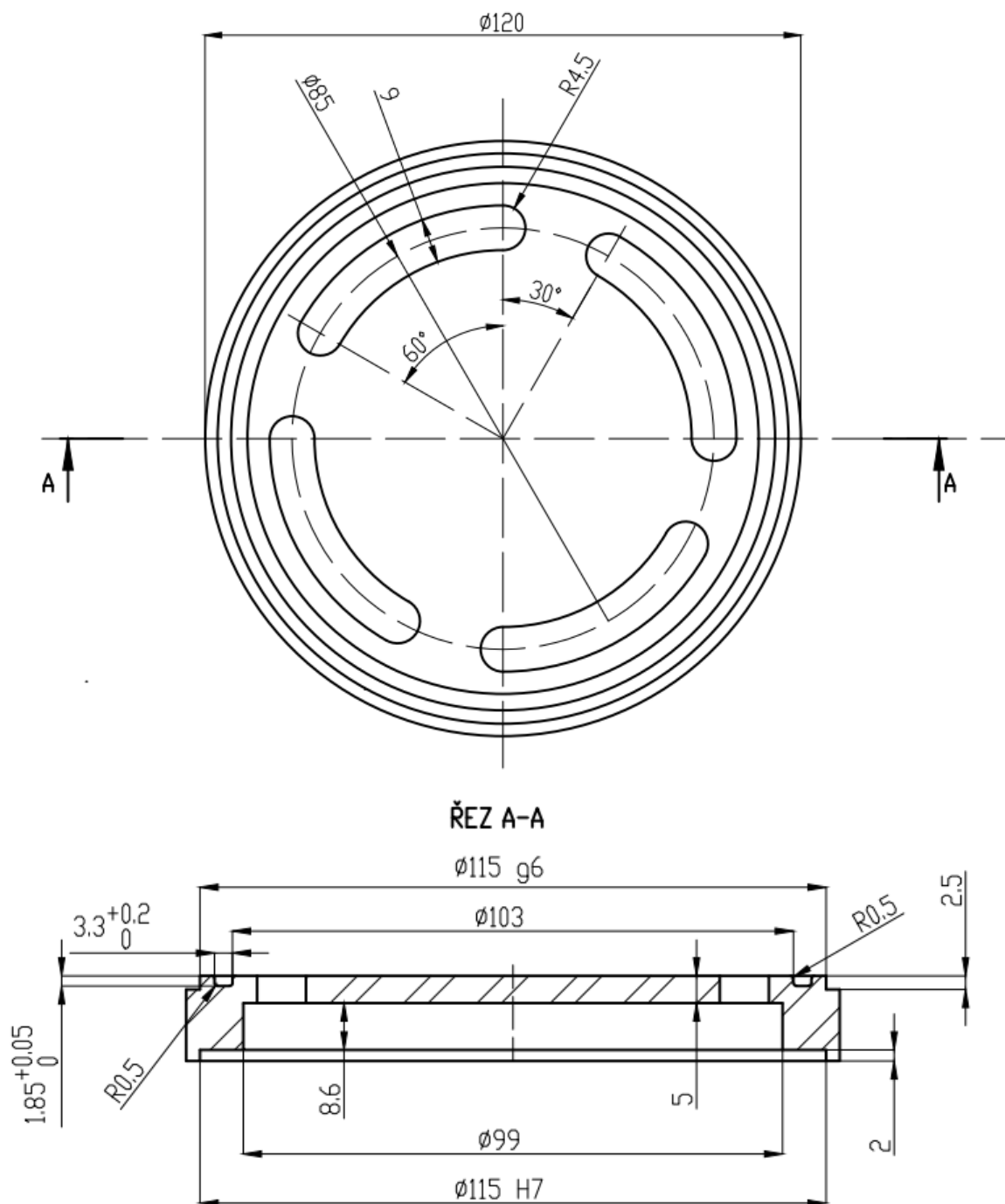
Obrázek 22: 3D model navrhovaného impaktoru



Obrázek 23: 1. stupeň impaktoru

1. stupeň je navržen pro odlučování částic  $PM_{10}$ . Každá tryska je opatřena kuželovým zahloubením, pro snížení tlakové ztráty a snadnějšímu usměrnění proudu. Z výkresu lze vidět dodržení poměrů délky trysky a jejího průměru a vzdálenosti konce trysky od impakční plochy a jejího průměru. První stupeň byl navrhnout se 4 tryskami o průměru 7 mm a délkou 7 mm, vzdálenost mezi koncem trysky a impakční plochou je také 7 mm. Důležitým prvkem v konstrukci jsou těsnící kroužky. Protože pracovní teploty mohou dosahovat teplot až 200 °C, byl vybrán o-kroužek z fluorové pryže, který by měl těmto teplotám odolat. Na dalším obrázku č. 24 je impakční plocha pro 1. stupeň.



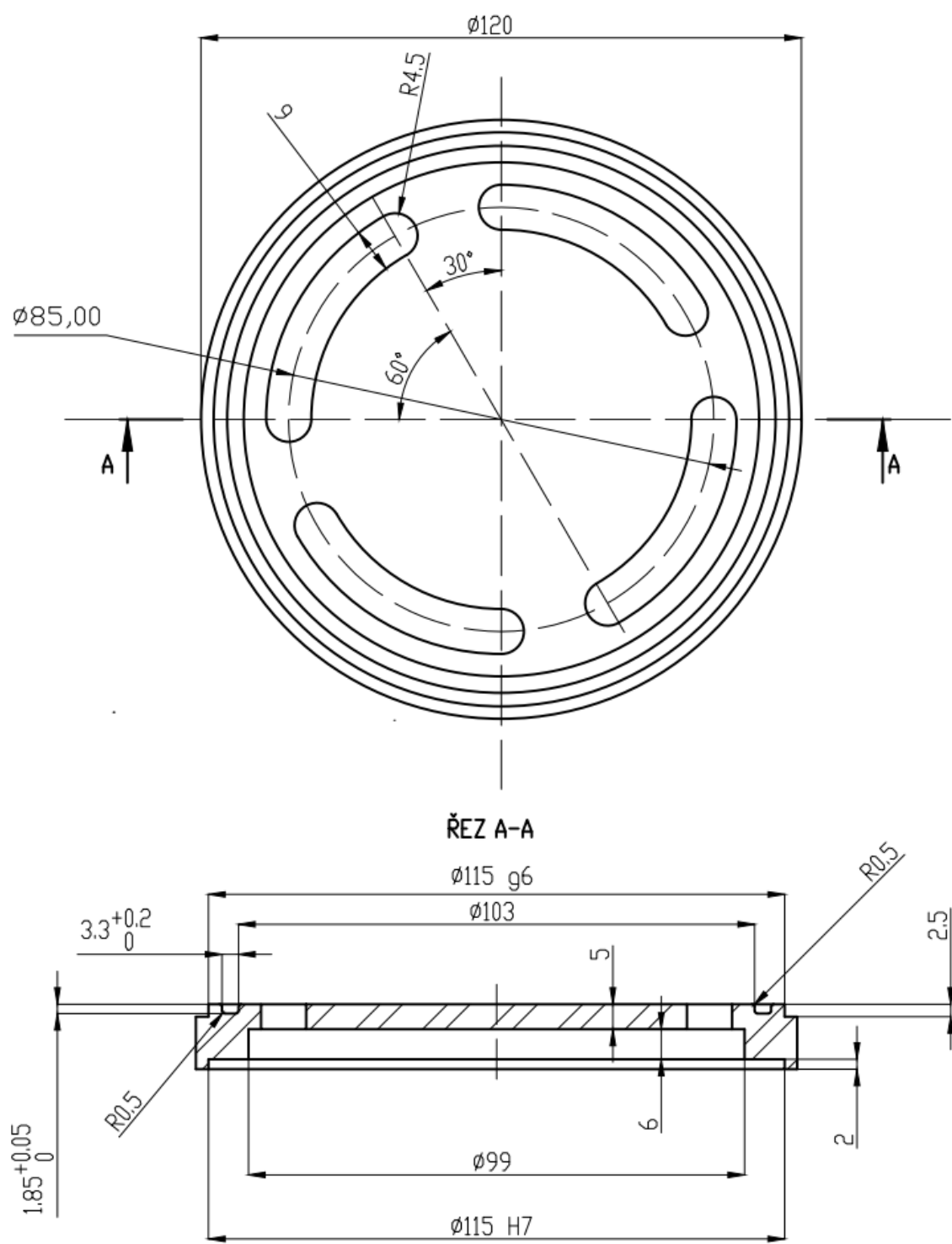


Obrázek 24: Impakční plocha 1. stupně

Pro impakční plochy platí podmínka, že pod tryskou musí být prostor pro impakci roven minimálně trojnásobku průměru trysky. Na plochu pod tryskami se pokládá již zmiňovaná aluminiová fólie, která se bude po měření vážit, pro určení naměřené koncentrace.

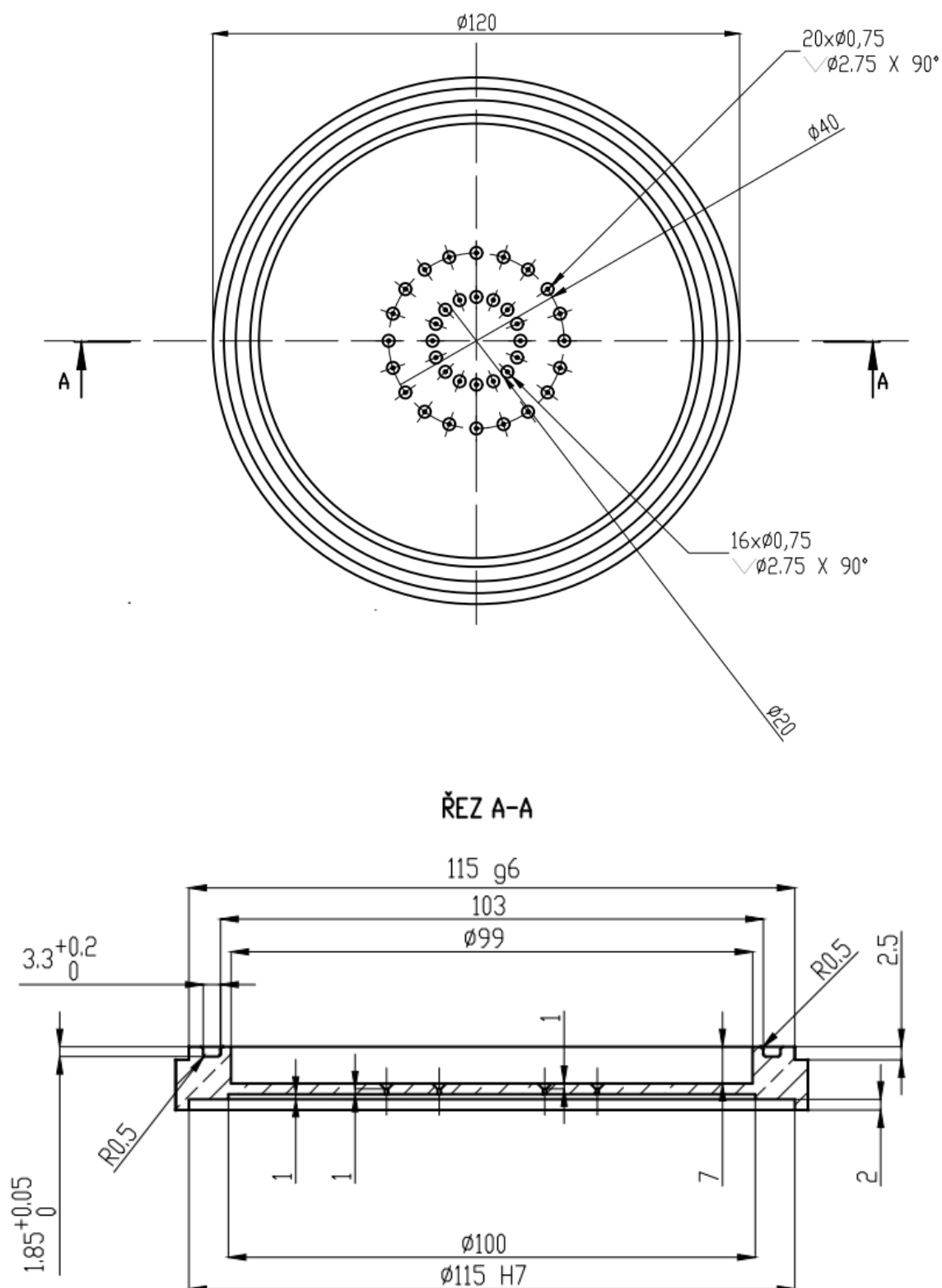
Technical drawing of a circular component, likely a flange or end view of a pipe. The drawing shows concentric circles representing different layers or holes. The outermost circle is labeled  $\phi 120$ . The innermost circle is labeled  $\phi 15$ . The central hole is labeled  $6 \times \phi 1,60$  THRU  $\sqrt{\phi 5,6 \times 90^\circ}$ . The outer ring is labeled  $14 \times \phi 1,60$  THRU  $\sqrt{\phi 5,6 \times 90^\circ}$ . The drawing includes a section line A-A and a dimension line R/5.

42



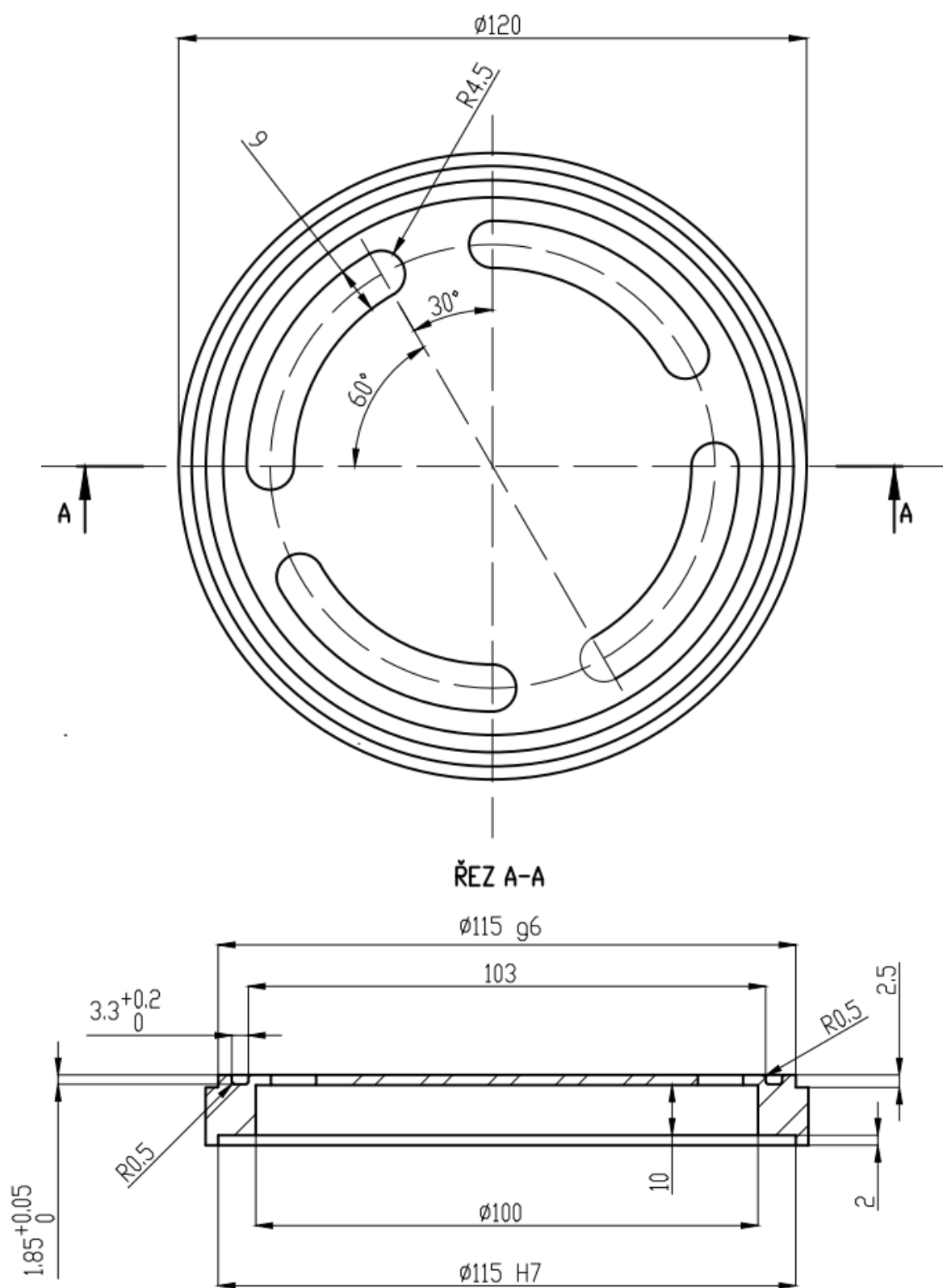
Obrázek 26: Impakční plocha 2. stupně

Třetí stupeň byl navržen se 36 tryskami o průměru 0,75 mm, délce 1 mm a vzdálenost konce trysky od impakční plochy 1 mm. U tohoto stupně musela být opět vzdálenost mezi impakční plochou 2. stupně a 3. stupněm rozdělena mezi tyto dva díly. Jednalo se tak opět z důvodů omezení při výrobě, tato omezení však mohou být eliminována do budoucna změnou materiálu či použitím jiných výrobních postupů, díky čemuž by nemusely být díly tak ojedinělé.



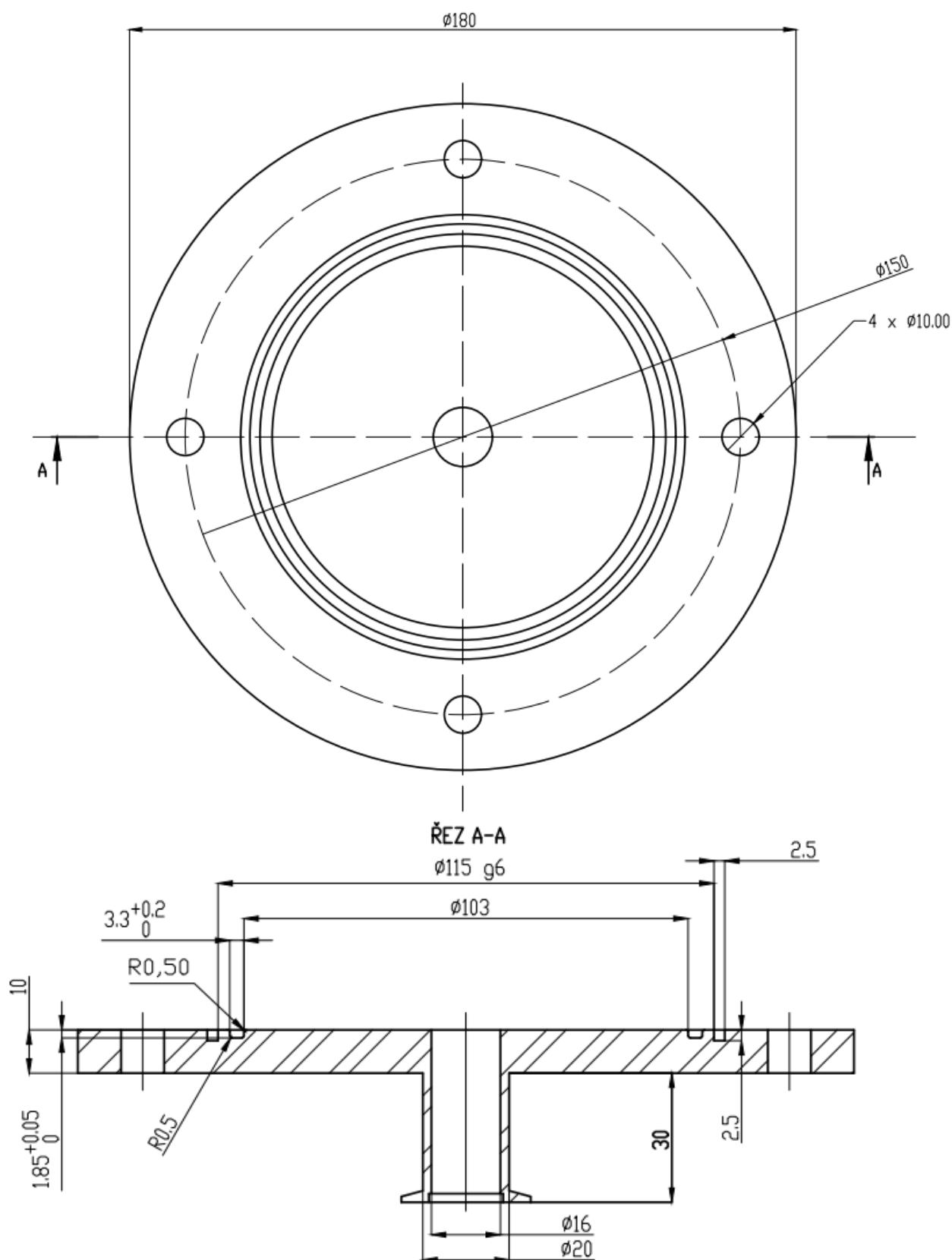
Obrázek 27: 3. stupeň impaktoru

Na obrázku č. 28 je impakční plocha 3. stupně. Jedná se o poslední díl, který je usazen na spodním dílu impaktoru.



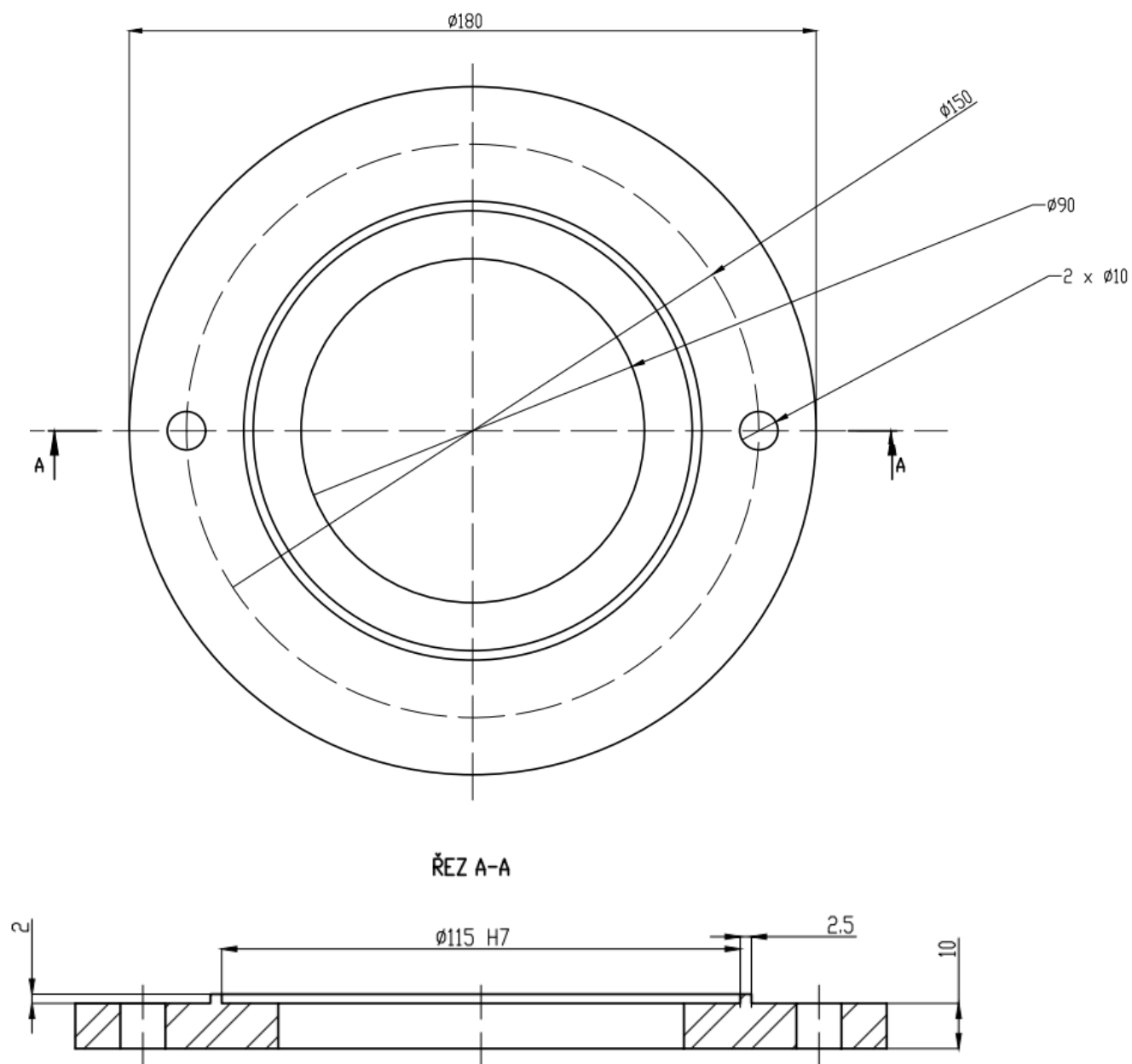
Obrázek 28: Impakční plocha 3. stupně

Jednotlivé stupně jsou usazeny na spodním díle, který je opatřen dírami pro závitové tyče, díky kterým je impaktor stlačen k sobě. Tyče zároveň slouží jako stojánek, díky čemuž je pod impaktorem místo pro odvod měřeného vzorku do vývěvy pomocí trubice.



Obrázek 29: Spodní díl

Vrchní díl spolu se spodním dílem drží jednotlivé stupně pohromadě a pomocí závitových tyčí je možné impaktor utáhnout a zajistit těsnost.



Obrázek 30: Vrchní díl

## 6.5. Příprava impaktoru pro měření

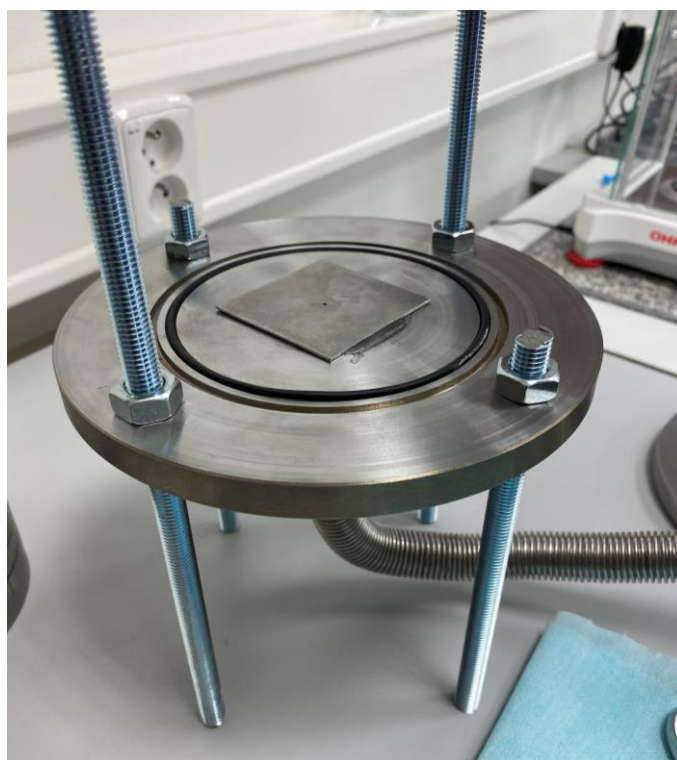
Při kompletaci impaktoru bylo k vrchnímu dílu za pomoci silikonu přidělána plechová deska s výústkou, díky které je snazší přivést měřící vzorek pomocí hadice.



Obrázek 31: Impaktor s výústkou

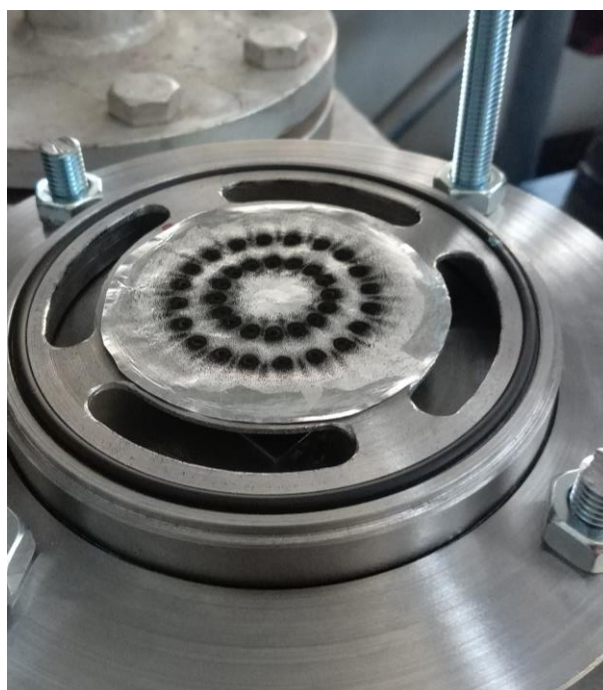
Dalším úkolem bylo vymyslet způsob regulace objemového toku, impaktor je navrhován pro  $\dot{V} = 21,4 \text{ l/min}$ . Aby se v impaktoru vskutku odlučovali částice, pro které byly jednotlivé stupně vypočetny, je zapotřebí se co nejvíce přiblížit právě tomuto toku. Výpočet trysky proběhl pomocí výpočtového postupu podle literatury clippard [18]. Do výpočtu kritické trysky vstupuje poměr mezi tlakem na vstupu, který je v tomto případě atmosférický, a tlakem na výstupu. Aby se jednalo o kritické proudění, tlak na výstupu musí být alespoň dvakrát menší než tlak na vstupu. Protože na výstupu impaktoru je vývěva, která vytváří tlak blízký vakuu, tento poměr je s jistotou zabezpečen. Z výpočtu tedy vyplývá, že pro zabezpečení objemového toku  $23,4 \text{ l/min}$  je zapotřebí kritická tryska o velikosti  $1,65 \text{ mm}$ , pro usnadnění výroby byl zvolen rozměr  $1,5 \text{ mm}$ , který odpovídá objemovému toku  $20 \text{ l/min}$ . Tryska byla vytvořena z tenkého plechu, do kterého byla vyvrtána díra o potřebném rozměru, ten byl poté pomoci silikonu přilepen ke spodnímu dílu impaktoru.





Obrázek 32: Spodní díl s kritickou tryskou

Dalším krokem byla příprava impakčních ploch. Jak již bylo zmíněno, na tyto plochy se pokládá aluminiová fólie, aby se při vážení naměřeného vzorku nevážilo celé patro, ale pouze tato fólie. Byly vystřižnuty fólie pro každý impakční stupeň tak, aby nezakrývaly otvory pro proudění, následně byly potřeny tenkým filmem vazelíny rozpuštěné v xylanu.



Obrázek 33: Fólie na impakční ploše 3. stupně po testovacím měření

Po těchto krocích je impaktor připraven pro testovací měření pro určení účinnosti odlučování částic.



Obrázek 34: Sestavený impaktor

## 6.6. Měřící trať

Pro časové omezení nebylo možné sestavit měřící trať pro srovnání navrhnutého impaktoru s profesionálním impaktorem dostupným v laboratoři. Bylo tedy uskutečněno pouze měření pro stanovení přibližné účinnosti odlučování samotného impaktoru. Měřící trať byla sestavena se zdrojem částic z komína krbových kamen. Odebíraly se horké spaliny, které při měření kondenzovaly v impaktoru, čímž znemožňovaly měření. Aby se tomu zabránilo, do trati byla přidána promývačka, která byla chlazená zmrzlým nasyceným roztokem soli, díky čemuž spaliny kondenzovaly v této promývačce. Ochlazené spaliny procházely impaktorem, kde se odlučovaly podle velikostí na jednotlivých stupních, a dále odcházely vývěvou. Vzorek se odebíral po dobu jedné minuty.

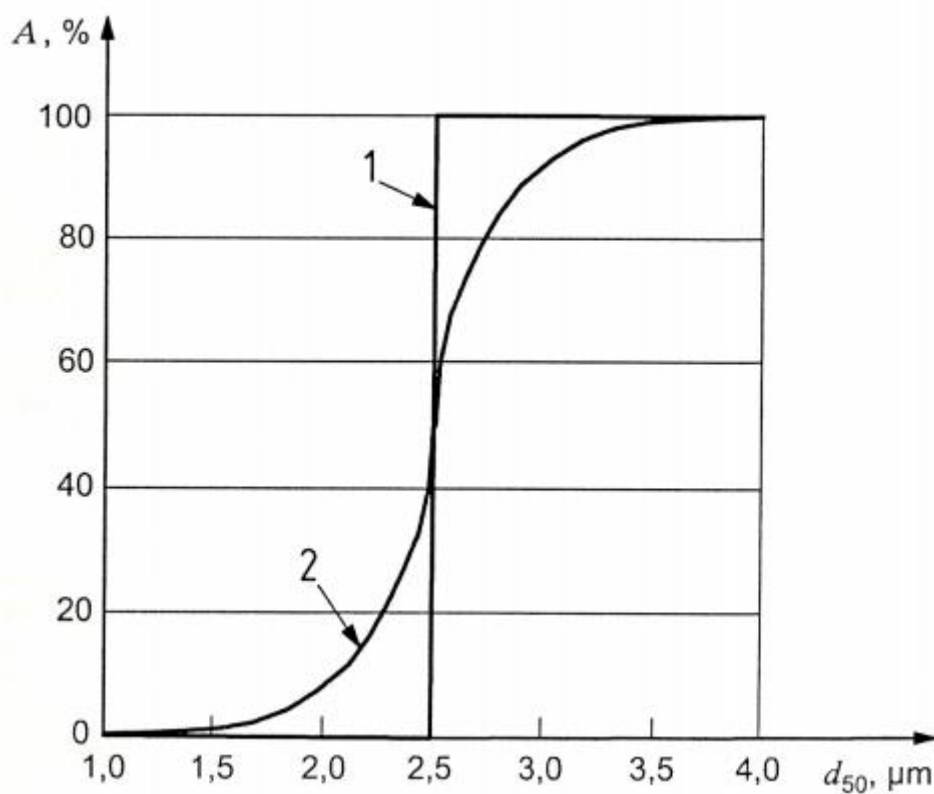
Z naměřených dat z tabulky č. 7 lze vidět, že největší podíl z odebíraného vzorku zastupují částice  $PM_{10}$ , menší množství poté částice  $PM_{2,5}$  a u částic  $PM_{10}$  nebylo naměřeno žádné množství. Toto rozdělení je u spalin z krbových kamen předpokládáno, to značí že by impaktor mohl měřit správná data. Je nutné zmínit, že bez známého průtoku není možné určit přesnou velikost částic, která se na jednotlivých stupních skutečně usazuje. Pomocí přibližného měření za pomoci anemometru byla změřena hodnota 27 l/min, to znamená že naměřené částice nebudou mít přesně požadovanou

velikost, na kterou byly stupně navrženy. Při návrhu se počítá s aerodynamickou velikostí částic, nelze tedy jednoduše změřit naměřené částice pomocí mikroskopu, protože budou mít jinou hustotu, tedy i jiné rozměry.

Tabulka 7: Naměřená data

Stupeň	Filtr před měřením [mg]	Filtr po měření [mg]	Naměřené částice [mg]
PM <sub>10</sub>	93,19	93,19	0
PM <sub>2,5</sub>	179,84	179,91	0,07
PM <sub>1</sub>	95,06	95,37	0,31

Velikost usazených částic také ovlivňuje frakční účinnost. Přestože je stupeň navržen pro odlučování určité velikosti částic, nikdy nedojde ke stoprocentnímu odloučení dané frakce. Na obrázku č. 35 je zobrazena teoretická odlučovací křivka (křivka 1) a reálná odlučovací křivka, kterou je potřeba experimentálně stanovit pro každý přístroj.



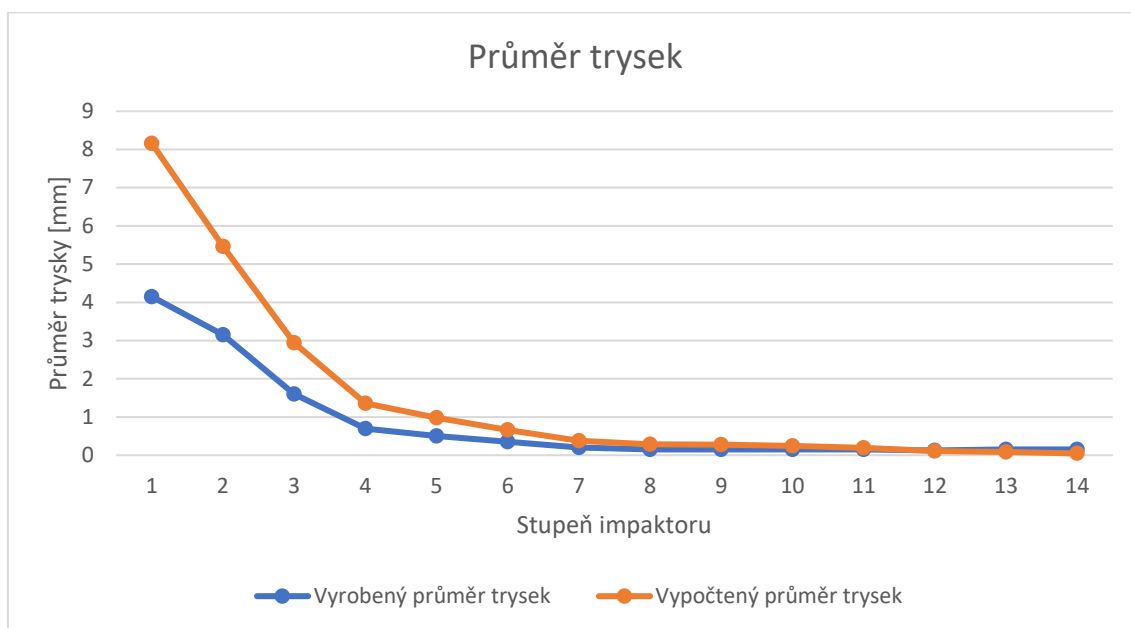
Obrázek 35: Teoretická a reálná frakční účinnost

## 6.7. Srovnání s profesionálním impaktorem

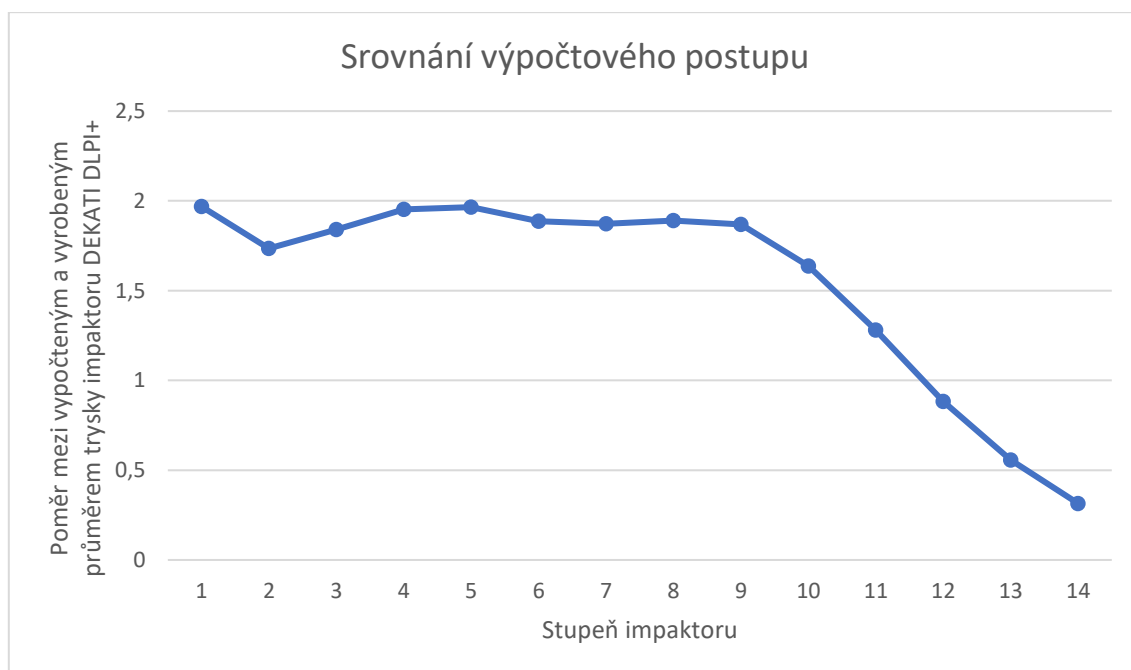
Pro srovnání byl vybrán dostupný impaktor DEKALTI DLPI+, jedná se o 14 stupňový impaktor s mnohem jemnějším rozdělením částic. Při srovnání byl použit výpočtový postup použitý v této práci, pro každé ze 14 pater byla zvolena odlučovaná frakce jako hodnota  $D_{50}$ . Následně byl vypočten průměr trysky, ten byl volen tak, aby byl zachován původní počet trysek pro snazší porovnání. Na obrázku č. 36 jsou vyneseny vypočtené hodnoty průměru trysek a reálné vyrobené rozměry trysek. Na dalším grafu v obrázku č. 37 jsou znázorněny poměry mezi vypočteným průměrem trysky a průměrem od výrobce.

Tabulka 8: Profesionální impaktor DEKATI DLPI+

Stupeň	Průměr trysky [mm]	Počet trysek	$D_{50}$ [μm]	Tlak [kPa]
1	4,15	1	9,79	101,32
2	3,15	1	5,32	101,30
3	1,6	3	3,62	101,25
4	0,7	14	2,45	101,18
5	0,5	17	1,62	101,00
6	0,35	20	0,938	100,45
7	0,2	48	0,596	99,56
8	0,15	50	0,377	97,03
9	0,15	27	0,252	88,48
10	0,15	19	0,152	68,30
11	0,15	21	0,0941	39,45
12	0,125	58	0,0552	22,85
13	0,15	69	0,0306	9,78
14	0,15	174	0,0147	4,00



Obrázek 36: Vypočtené a vyrobené průměry trysek



Obrázek 37: Srovnání výpočtového postupu

Lze si povšimnout, že mezi stupni 1 až 9 se jedná o téměř konstantní poměr a tedy trysky by měly být podle použitého výpočtového postupu mezi těmito stupni v průměru o 88 % větší. Na dalších stupních tento poměr postupně klesá a od 12. stupně jsou naopak trysky od výrobce větší než vypočtené hodnoty. Důvodem této změny může být pracovní tlak, v tabulce č. 5 jsou zadané hodnoty tlaku na jednotlivých stupních impaktoru a lze vidět, že od 10. stupně začíná tlak rychle klesat. Z toho lze usoudit, že použitý výpočetní postup nezohledňuje vliv pracovního tlaku na jednotlivých patrech. Jak již bylo řečeno v minulých kapitolách, poměr mezi velikostí průměru trysky a vzdáleností mezi koncem trysky a impakční plochou se může pohybovat v relativně širokém intervalu. Při návrhu

impaktoru jsem se tento poměr snažil zachovat roven 1, výrobce impaktoru DEKATI DLPI+ však může používat jinou hodnotu, což může způsobovat rozdíl mezi vypočteným a vyrobeným rozměrem trysek u prvních 9 stupňů. Větší vzdálenost mezi tryskou a impakční plochou by také mohla vyřešit problém, který nastal při měření vzorku z křbových kamen, a to odrazu částic od impakční plochy a usazení na spodní straně stupně s tryskami.

## 7. Závěr

V úvodu práce byly popsány základní vlastnosti částic suspendovaných v ovzduší a jejich chování. Dále se práce zaměřila na vliv částic na lidské zdraví, životní prostředí a vývoj stavu ovzduší v České republice. Popsána byla česká legislativa týkající se ochrany ovzduší, hlavním právním předpisem pro tuto problematiku je zákon z roku 2012 č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a na něj navazující vyhlášky. Zajímavým poznatkem z této legislativy je fakt, že jsou imisní limity stanoveny zvláště pro frakce  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  a emisní pouze pro celkovou koncentraci TZL a několika dalších vybraných látek. Z kapitoly 2.2. vliv na lidské zdraví vyplývá, že riziko částic stoupá se zmenšující se velikostí částice. Je tedy zvláštní, že neexistují žádné imisní limity pro částice  $PM_1$ . Jedním z důvodů může být, že donedávna byly tyto částice poměrně složitě detekovatelné a také je relativně obtížné tyto částice zachytávat u zdrojů.

Následně byl v praktické části popsán matematický model Virgil A. Marpla [16] pro návrh kaskádového impaktoru, podle kterého byl navrhnut třístupňový impaktor pro třídění frakcí  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$ . Impaktor byl vyroben, sestaven a otestován v laboratoři. Pro impaktor byla vypočtena a vyrobena škrticí clona, která slouží jako kritická tryska a udává maximální průtok impaktorem na hodnotu 20 l/min. V měřící trati se použila jako zdroj částic krbová kamna, výsledky tohoto měření byly popsány v kapitole 6.6. Měřící trať.

Dalším cílem práce bylo porovnat vyrobený impaktor s dostupným profesionálním impaktorem DEKATI DLPI+. V tomto kroku byl použit stejný matematický model s tím rozdílem, že byly použity hodnoty objemového toku, se kterým pracuje impaktor DEKATI DLPI+, a požadovaná velikost tříděné frakce zadána hodnotou  $D_{50}$  pro jednotlivá patra. Výsledkem je graf na obrázku č. 37, ze kterého lze vidět, že poměr mezi vypočteným a vyrobeným průměrem trysky je na prvních 9 stupních relativně konstantní a začne se měnit až na dalších stupních. Ačkoliv je poměr konstantní, jedná se o 88% rozdíl ve velikosti trysek. Ten může být způsoben odlišným poměrem mezi velikostí trysky a vzdáleností mezi koncem trysky a impakční plochou. Měnění se poměr na dalších stupních může být vysvětlen velkým rozdílem pracovního tlaku oproti předchozím stupňům, který může matematický model ovlivnit.

Pro příští iteraci vyrobeného impaktoru by bylo vhodné upravit impakční plochu pro filtr, na kterém se částice usazují. Impaktor DEKATI tyto filtry zabezpečuje pomocí kovového kroužku, díky kterému se filtr při manipulaci s impaktorem nepohne. Takto zabezpečený filtr se také napne, čímž se zamezí nerovnostem. Dalším vylepšením by mohlo být zahloubení na spodním dílu, na které by se mohly pokládat vyměnitelné škrticí clony. Impaktor by tak mohl pracovat s různými objemovými toky a byl by vhodný pro více případů.

## Citovaná literatura

- [1] LACIOK, Vendula. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic*. Ostrava, 2015. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce Ivana Bartlová.
- [2] SITEK, Tomáš. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem*. Brno, 2018, 89 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- [3] Znečištění venkovního ovzduší prachem. In: *KRAJSKÁ HYGIENICKÁ STANICE MORAVSKOSLEZSKÉHO KRAJE SE SÍDLEM V OSTRAVĚ* [online]. Ostrava: KRAJSKÁ HYGIENICKÁ STANICE MORAVSKOSLEZSKÉHO KRAJE SE SÍDLEM V OSTRAVĚ, 2006 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.khsova.cz/homepage/detail-aktuality/159?setpage=206&lastpage=221>
- [4] Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum Verständnis der Rolle von Aerosolpartikeln beim SARS-CoV-2 Infektionsgeschehen: Český překlad pod záštitou České aerosolové společnosti. In: *Gesellschaft für Aerosolforschung* [online]. Köln: GAeF, 2021 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.info.gaef.de/positionspapier>
- [5] ČSN EN ISO 23210. *Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace frakce PM<sub>10</sub>/PM<sub>2,5</sub> v odpadním plynu - Stanovení nízkých koncentrací pomocí impaktorů*. 2010.
- [6] Znečištění ovzduší. In: *Evropská agentura pro životní prostředí* [online]. Copenhagen: EEA, 2007 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/themes/air/intro>
- [7] Ambient (outdoor) air pollution. In: *World Health Organization* [online]. Ženeva: WHO [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [8] ČSN ISO 7708. *Kvalita ovzduší - Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik*. 1998.
- [9] ROM, William a Steven MARKOWITZ. *Environmental and occupational medicine*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins, 2007. ISBN 978-0781762991.



- [10] Kvalita ovzduší. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: MZP, 2008 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/kvalita\\_ovzdusi](https://www.mzp.cz/cz/kvalita_ovzdusi)
- [11] HENELOVÁ, Vladimíra a Jan ANDREOVSKÝ. *Příručka ochrany kvality ovzduší*. 1. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7.
- [12] Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2019. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: CHMI, 1954 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/Obzah\\_CZ.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/Obzah_CZ.html)
- [13] *Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší*. In: . 2012. Dostupné také z: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0&action=openDocument>
- [14] *Vyhláška č. 415/2012 Sb.* In: . 2012, číslo 415. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/main\\_topic.xsp?documentId=ae682a6b5e42e986c1257ba60025d8b5](https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/main_topic.xsp?documentId=ae682a6b5e42e986c1257ba60025d8b5)
- [15] Kvalita ovzduší na území České republiky v roce 2020: Předběžné zhodnocení. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: CHMI, 1954 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/mes\\_zpravy/Rocni\\_zprava\\_2020.pdf](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/mes_zpravy/Rocni_zprava_2020.pdf)
- [16] *Fine Particles. Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis*. 1. Minneapolis: Academic Press, 1976. ISBN 978-0-12-452950-2.
- [17] NEWTON, G.J., O.G. RAABE a B.V. MOKLER. *Cascade impactor design and performance*. 5. Great Britain: Pergamon Press, 1977. ISBN ISSN 0021-8502.
- [18] Orifice Size Calculator. *Clippard* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://clippard.com/cms/orifice-size-calculator>

## Seznam použitých symbolů

$PM_x$	$[\mu m]$	Částice menší než $x \mu m$
$c_m$	$[g/m^3]$	Hmotnostní koncentrace
$m_1$	$[g]$	Hmotnost čistého filtru
$m_0$	$[g]$	Hmotnost filtru po odběru
$V$	$[m^3]$	Objem odsátého plynu
$Stk$	$[-]$	Stokesovo číslo
$\rho_\zeta$	$[kg/m^3]$	Hustota částice
$C$	$[-]$	Cunninghamův korekční součinitel na skluz
$D_\zeta$	$[m]$	Průměr částice
$\eta$	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita tekutiny
$D$	$[m]$	Průměr trysky
$v$	$[m/s]$	Rychlost proudění
$\dot{V}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok stupněm
$n$	$[-]$	Počet trysek ve stupni
$Re$	$[-]$	Reynoldsovo číslo
$T$	$[K]$	Termodynamická teplota vzduchu
$\lambda$	$[m]$	Střední dráha molekul
$p$	$[Pa]$	Tlak vzduchu
$r$	$[J/(kg \cdot K)]$	Měrná plynová konstanta
$S$	$[m]$	Vzdálenost mezi výstupem trysky a impakční plochou
$L$	$[m]$	Délka trysky
$A$	$[\%]$	Frakční účinnost
$D_{50}$	$[\mu m]$	Velikost částice, která se odlučuje s 50% frakční účinností

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Interval velikostí částic [2].....	11
Obrázek 2: Gravitační sedimentace kulové částice [4] .....	12
Obrázek 3: Ekvivalentní velikost částice se zachováním rychlosti usazování [5] .....	13
Obrázek 4: Zachycení částic v těle .....	14
Obrázek 5: Podíl zachycených částic z experimentů na dobrovolnících [9].....	15
Obrázek 6: Trendy ročních charakteristik PM <sub>10</sub> a PM <sub>2,5</sub> v České republice, 1996-2013 [12] .....	18
Obrázek 7: Vývoj celkových emisí částic v České republice, 1990-2018 [12] .....	18
Obrázek 8: Podíl sektorů na celkových emisích PM <sub>10</sub> v roce 2018 [12] .....	21
Obrázek 9: Podíl sektorů na celkových emisích PM <sub>2,5</sub> v roce 2018 [12] .....	21
Obrázek 10: Lokality měření imisí v roce 1970 [12] .....	25
Obrázek 11: Usazovací komora .....	27
Obrázek 12: Kaskádový impaktor .....	27
Obrázek 13: Fotometrická metoda.....	28
Obrázek 14: Vzorkování podle elektrické mobility.....	29
Obrázek 15: Schéma navrhovaného impaktoru .....	30
Obrázek 16: Stokesovo číslo v závislosti na Reynoldsovo čísle [16].....	32
Obrázek 17: Závislost Reynoldsova čísla na teplotě.....	35
Obrázek 18: Řez stupněm impaktoru [16].....	36
Obrázek 19: Vliv poměrů L/D a S/D na Stk [16].....	37
Obrázek 20: Vliv poměrů L/D a S/D na účinnosti odlučování [16] .....	37
Obrázek 21: Vliv povrchu impakční plochy na účinnost odlučování [16].....	38
Obrázek 22: 3D model navrhovaného impaktoru .....	39
Obrázek 23: 1. stupeň impaktoru .....	40
Obrázek 24: Impakční plocha 1. stupně .....	41
Obrázek 25: 2. stupeň impaktoru .....	42
Obrázek 26: Impakční plocha 2. stupně .....	43
Obrázek 27: 3. stupeň impaktoru .....	44
Obrázek 28: Impakční plocha 3. stupně .....	45
Obrázek 29: Spodní díl.....	46
Obrázek 30: Vrchní díl .....	47
Obrázek 31: Impaktor s výústkou .....	48
Obrázek 32: Spodní díl s kritickou tryskou .....	49
Obrázek 33: Fólie na impakční ploše 3. stupně po testovacím měření .....	49
Obrázek 34: Sestavený impaktor.....	50
Obrázek 35: Teoretická a reálná frakční účinnost .....	51
Obrázek 36: Vypočtené a vyrobené průměry trysek.....	53
Obrázek 37: Srovnání výpočtového postupu .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Obecné emisní limity [14] .....	20
Tabulka 2: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [13].....	22
Tabulka 3: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [13].....	23
Tabulka 4: Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM <sub>10</sub> vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [13] .....	23
Tabulka 5: Hodnoty Cunninghamova korekčního součinitele pro jednotlivé frakce .....	34
Tabulka 6: Počet a velikost trysek jednotlivých stupňů.....	34
Tabulka 7: Naměřená data .....	51
Tabulka 8: Profesionální impaktor DEKATI DLPI+.....	52

## Seznam příloh

1. Výkres 1. stupně
2. Výkres impakční plochy 1. stupně
3. Výkres 2. stupně
4. Výkres impakční plochy 2. stupně
5. Výkres 3. stupně
6. Výkres impakční plochy 3. stupně
7. Výkres spodního dílu
8. Výkres vrchního dílu